

EVALUACIÓN DE LAS EMISIONES REGULADAS DE UN MOTOR DE
COMBUSTIÓN INTERNA ENCENDIDO POR CHISPA, OPERANDO CON
MEZCLAS GASOLINA-ETANOL ANHIDRO EN LA CIUDAD DE BOGOTÁ.

RODRIGO ARMANDO MORILLO CASTAÑO

FUNDACIÓN UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA INGENIERÍA MECÁNICA
BOGOTÁ
2016

EVALUACIÓN DE LAS EMISIONES REGULADAS DE UN MOTOR DE
COMBUSTIÓN INTERNA ENCENDIDO POR CHISPA, OPERANDO CON
MEZCLAS GASOLINA-ETANOL ANHIDRO EN LA CIUDAD DE BOGOTÁ.

RODRIGO ARMANDO MORILLO CASTAÑO

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Mecánico

Director
ALEXANDER GARCÍA MARIACA
Ingeniero Mecánico

FUNDACIÓN UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA INGENIERÍA MECÁNICA
BOGOTÁ
2016

Nota de Aceptación

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

Bogotá, Primero de Diciembre de 2016

Dedicatoria...

A Magdalena, por tres décadas
creyendo en mí y apoyándome
en mis proyectos: gracias por
todo, te dedico este logro.

AGRADECIMIENTOS

A la Fundación Universitaria Los Libertadores, por el apoyo y la financiación del proyecto de investigación.

A los ingenieros Claudio Moreno, Oscar Chamarraví Guerra, Silvio Alejandro Jiménez Castellanos, Alexander García Mariaca, docentes del departamento de ingeniería mecánica y al físico Eduard Fernando Piratova, docente del área de ciencias básicas, por sus incontables ayudas y asesorías durante mi formación como ingeniero.

A los ingenieros Alejandro Caicedo y Germán Saavedra por su asesoría y valiosa colaboración con el montaje experimental.

A los ingenieros Víctor Carrillo y Alexander García Mariaca, y al futuro ingeniero Juan Camilo Velasco, equipo con el que se desarrolló el proyecto de investigación en el cual está contenido este trabajo de grado, por su aporte y compromiso.

A los monitores de laboratorios cuya ayuda y colaboración facilitaron esta labor.

A todos ellos ¡Gracias!

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	15
1. OBJETIVOS.....	16
1.1 OBJETIVO GENERAL	16
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	17
2.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	17
2.2 JUSTIFICACIÓN.....	17
2.3 PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN	19
3. MARCO DE REFERENCIA.....	20
3.1 MARCO TEÓRICO	20
3.1.1 FUNCIONAMIENTO DE UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA ENCENDIDO POR CHISPA (MCI-EP)	20
3.1.2 COMBUSTIBLE	22
3.2 MARCO CONCEPTUAL.....	25
3.2.1 DESEMPEÑO EN MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA	25
3.2.2 EMISIONES DE UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA.....	28
3.3 MARCO LEGAL.....	29
3.3.1 LEY 1715 DE 2014	29
3.3.2 LEY 693 DE 2001	30
3.4 ESTADO DEL ARTE	31
4. MATERIALES Y MÉTODOS	38
4.1 MATERIALES Y EQUIPOS	38
4.1.1 EQUIPOS.....	38
4.1.2 MATERIALES Y SUMINISTROS	39
4.2 METODOLOGÍA	40
4.2.1 PUESTA A PUNTO DE BANCO DE PRUEBAS PARA MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA.....	40

4.2.2 TOMA DE DATOS EXPERIMENTALES	40
4.2.3 ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN	41
4.3 PRESUPUESTO.....	42
4.3.1 FUENTES DE FINANCIACIÓN.....	42
4.3.2 TABLAS DE PRESUPUESTO	42
4.4 CRONOGRAMA	45
5. MONTAJE EXPERIMENTAL	46
5.1 EQUIPOS E INSTRUMENTOS.....	53
5.2 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....	54
5.3 VARIACIONES AL DISEÑO EXPERIMENTAL	56
6. ANÁLISIS Y RESULTADOS	57
6.1 CONSUMO ESPECÍFICO DE COMBUSTIBLE AL FRENO	59
6.2 EFICIENCIA TÉRMICA	63
6.3 EMISIONES ESPECÍFICAS AL FRENO	67
6.3.1 BSCO ₂	68
6.3.2 BSCO.....	72
6.3.3 BSNO _x	76
6.3.4 BSHC.....	80
6.4 PORCENTAJES GENERALES DE VARIACIÓN RESPECTO A E10.....	83
6.5 MODELO ESTADÍSTICO: LÍNEAS DE TENDENCIA	85
6.6 MATRIZ DE SELECCIÓN.....	92
CONCLUSIONES	94
RECOMENDACIONES	96
BIBLIOGRAFÍA.....	97

LISTA DE TABLAS

	Pág
Tabla 1 - Comparativo de consumo específico de combustible al freno respecto a E10 para cada velocidad del motor. Fuente: Elaboración propia.	63
Tabla 2 - Comparativo de eficiencia térmica respecto a E10 para cada velocidad del motor. Fuente: Elaboración propia.	67
Tabla 3 - Comparativo de emisión específica de CO ₂ al freno respecto a E10 para cada velocidad del motor. Fuente: Elaboración propia.....	71
Tabla 4 - Comparativo de emisión específica de CO al freno respecto a E10 para cada velocidad del motor. Fuente: Elaboración propia.....	75
Tabla 5 - Comparativo de emisión específica de NO _x al freno respecto a E10 para cada velocidad del motor. Fuente: Elaboración propia.....	79
Tabla 6 - Comparativo de emisión específica de HC al freno respecto a E10 para cada velocidad del motor. Fuente: Elaboración propia.....	83
Tabla 7 - Porcentajes generales de variación respecto a E10. Fuente: Elaboración propia.	84
Tabla 8 - Tendencias BSFC. Fuente: Elaboración propia.	86
Tabla 9 - Tendencias eficiencia térmica. Fuente: Elaboración propia.	87
Tabla 10 - Tendencias BSCO ₂ . Fuente: Elaboración propia.	88
Tabla 11 - Tendencias BSCO. Fuente: Elaboración propia.....	89
Tabla 12 - Tendencias BSNO _x . Fuente: Elaboración propia.....	90
Tabla 13 - Tendencias BSHC. Fuente: Elaboración propia.	91
Tabla 14 - Matriz de selección. Fuente: Elaboración Propia.	92

LISTA DE GRÁFICAS

	Pág
Gráfico 1 - Ciclo de operación de un motor de 4 tiempos encendido por chispa. De Heywood [7].....	22
Gráfico 2 - Diagrama P - V típico de un motor de combustión interna de cuatro tiempos. De Pulkrabek [6].....	25
Gráfico 3 - Consumo específico de combustible al freno en función de la presión media efectiva al freno para 2700 RPM. Fuente: Elaboración propia.	60
Gráfico 4 - Consumo específico de combustible al freno en función de la presión media efectiva al freno para 3600 RPM. Fuente: Elaboración propia.	61
Gráfico 5 - Consumo específico de combustible al freno en función de la presión media efectiva al freno para 4320 RPM. Fuente: Elaboración propia.	62
Gráfico 6 - Eficiencia térmica en función de la presión media efectiva al freno para 2700 RPM. Fuente: Elaboración propia.	64
Gráfico 7 - Eficiencia térmica en función de la presión media efectiva al freno para 3600 RPM. Fuente: Elaboración propia.	65
Gráfico 8 - Eficiencia térmica en función de la presión media efectiva al freno para 4320 RPM. Fuente: Elaboración propia.	66
Gráfico 9 - Emisión específica de CO_2 al freno en función de la presión media efectiva al freno para 2700 RPM. Fuente: Elaboración propia.....	68
Gráfico 10 - Emisión específica de CO_2 al freno en función de la presión media efectiva al freno para 3600 RPM. Fuente: Elaboración propia.....	69
Gráfico 11 - Emisión específica de CO_2 al freno en función de la presión media efectiva al freno para 4320 RPM. Fuente: Elaboración propia.....	70
Gráfico 12 - Emisión específica de CO al freno en función de la presión media efectiva al freno para 2700 RPM. Fuente: Elaboración propia.....	72
Gráfico 13 - Emisión específica de CO al freno en función de la presión media efectiva al freno para 3600 RPM. Fuente: Elaboración propia.....	73
Gráfico 14 - Emisión específica de CO al freno en función de la presión media efectiva al freno para 4320 RPM. Fuente: Elaboración propia.....	74
Gráfico 15 - Emisión específica de NO_x al freno en función de la presión media efectiva al freno para 2700 RPM. Fuente: Elaboración propia.....	76
Gráfico 16 - Emisión específica de NO_x al freno en función de la presión media efectiva al freno para 3600 RPM. Fuente: Elaboración propia.....	77

Gráfico 17 - Emisión específica de NO _x al freno en función de la presión media efectiva al freno para 4320 RPM. Fuente: Elaboración propia.....	78
Gráfico 18 - Emisión específica de HC al freno en función de la presión media efectiva al freno para 2700 RPM. Fuente: Elaboración propia.....	80
Gráfico 19 - Emisión específica de HC al freno en función de la presión media efectiva al freno para 3600 RPM. Fuente: Elaboración propia.....	81
Gráfico 20 - Emisión específica de HC al freno en función de la presión media efectiva al freno para 4320 RPM. Fuente: Elaboración propia.....	82
Gráfico 21 - Puntuación ponderada para mezclas gasolina etanol. Fuente: Elaboración propia.	93
Gráfico 22 - Puntuación discriminada para mezclas gasolina etanol. Fuente: Elaboración propia.	93

LISTA DE FIGURAS

	Pág
Figura 1 - Vista en planta del montaje experimental, imagen tomada durante la pausa de almuerzo en la toma experimental en octubre de 2016. Fuente: Elaboración propia.	46
Figura 2 - Esquema montaje sistema de aire. Fuente: Elaboración propia.	47
Figura 3 - Montaje sistema de aire. Fuente: Elaboración propia.	47
Figura 4 - Esquema montaje sistema de combustible. Fuente: Elaboración propia.	48
Figura 5 - Montaje sistema de combustible. Fuente: Elaboración propia.	48
Figura 6 - Esquema montaje analizador de gases. Fuente: Elaboración propia.	49
Figura 7 - Esquema montaje de generador eléctrico. Fuente: Elaboración propia.	49
Figura 8 - Esquema zona de mezclas. Fuente: Elaboración propia.	50
Figura 9 - Esquema motor y transmisión. Fuente: Elaboración propia.	50
Figura 10 - Motor y transmisión. Fuente: Elaboración propia.	50
Figura 11 - Esquema banco de resistencias. Fuente: Elaboración propia.	51
Figura 12 - Banco de resistencias. Fuente: Elaboración propia.	51
Figura 13 - Esquema montaje encoder. Fuente: Elaboración propia.	52
Figura 14 - Montaje encoder. Fuente: Elaboración propia.	52
Figura 15 - Esquema montaje de temperatura. Fuente: Elaboración propia.	53

LISTA DE ANEXOS

	Pág
ANEXO A: Formatos de recolección de datos	101
ANEXO B: Parámetros constantes.....	104
ANEXO C: Resumen de resultados.....	105

GLOSARIO

BMEP: Presión media efectiva al freno.

BSFC: Consumo específico de combustible al freno.

BP: Potencia al freno.

BSCO₂: Emisión específica de dióxido de carbono al freno.

BSCO: Emisión específica de monóxido de carbono al freno.

BSNO_x: Emisión específica de óxidos de nitrógeno al freno.

BSHC: Emisión específica de hidrocarburos sin quemar al freno.

MCI-EP: Motor de combustión interna de encendido provocado.

RESUMEN

En esta investigación se midieron emisiones reguladas de HC, CO₂, CO y NO_x a partir de pruebas realizadas utilizando las mezclas de gasolina-etanol anhidro E10, E15, E20, E40, E60, E85 y E100, en un motor de combustión interna encendido por chispa, monocilíndrico, carburado y de admisión atmosférica en la ciudad de Bogotá, a 2600 metros sobre el nivel del mar, a 3 regímenes de giro y con 25, 50, 75 y 100% de carga. Con las mediciones realizadas se calcularon las emisiones específicas al freno, datos que se usaron para comparar los combustibles utilizados con el fin de determinar la eficiencia energética y las menores emisiones contaminantes en función del trabajo producido, encontrando que las mejores mezclas en términos de potencia al freno, consumo específico de combustible y emisiones específicas son E40 y E10 para las condiciones evaluadas. En términos exclusivamente de emisiones específicas al freno la mejor mezcla es E100.

PALABRAS CLAVE: Consumo específico de combustible, Emisiones específicas reguladas, Mezcla gasolina-etanol, Motor de combustión interna encendido por chispa (MCI-EP), 2600 msnm.

INTRODUCCIÓN

Los motores de combustión interna son ampliamente utilizados en la actualidad en diversas aplicaciones, de las cuales quizá la más amplia y una de las principales es la locomoción de automóviles. Como consecuencia directa del uso de este tipo de motores se producen emisiones contaminantes al ambiente, las cuales son reguladas debido a la gran cantidad de emisiones y los efectos que producen éstas en la atmósfera.

En el presente trabajo de grado se realizará una investigación sobre el efecto del porcentaje de la mezcla gasolina-etanol en un motor de combustión interna encendido por chispa operando en la ciudad de Bogotá, sobre las emisiones específicas reguladas: Hidrocarburos sin quemar (HC), Monóxido de Carbono (CO), Dióxido de Carbono (CO₂) y Óxidos de Nitrógeno (NO_x) en relación a la eficiencia energética del trabajo producido y el combustible utilizado para ello.

Las emisiones de los gases de escape de los motores de combustión interna, producto de la combustión entre aire y combustible, son uno de los factores de contaminación atmosférica. En los esfuerzos conjuntos para disminuir la contaminación en el mundo se requieren datos científicos confiables y actualizados a las condiciones y tecnologías en uso, enfocados en un entorno geográfico con todas las implicaciones geopolíticas de éste.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar y analizar las emisiones de un motor de combustión interna encendido por chispa en la ciudad de Bogotá, operando con diferentes condiciones de carga y velocidad, utilizando diferentes porcentajes de mezcla de gasolina-etanol anhidro.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Medir emisiones reguladas del motor de combustión interna encendido por chispa, operando con mezclas controladas de gasolina-etanol en un banco dinamométrico de pruebas.

Calcular las emisiones específicas al freno reguladas del motor de combustión interna encendido por chispa, organizando los resultados en gráficas según la mezcla gasolina-etanol utilizada.

Comparar las emisiones específicas al freno reguladas del motor de combustión interna encendido por chispa, en términos de eficiencia energética.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Las emisiones contaminantes producidas por los motores de combustión interna son una preocupación actual, tanto para los organismos reguladores, como para los fabricantes de vehículos y los usuarios finales. El desarrollo de fuentes alternativas de energía, que incluyen combustibles alternativos, es uno de los caminos que está tomando la sociedad para ponerse al frente del compromiso ambiental que el mundo demanda. La ingeniería es el área de la ciencia llamada a responder a las necesidades de energías y combustibles menos contaminantes y procesos cada vez más eficientes, por lo que es importante tener datos cuantitativos comparables entre las alternativas disponibles. El etanol se ha utilizado como carburante oxigenado en la gasolina en Colombia [1] y sin embargo no hay suficiente información disponible sobre los efectos exactos de la mezcla gasolina-etanol en las emisiones de un motor de combustión interna encendido por chispa operando bajo las condiciones ambientales de presión y altitud de Bogotá.

2.2 JUSTIFICACIÓN

Sin información sobre emisiones de la mezcla gasolina-etanol en la ciudad de Bogotá, no se tiene una base científica para establecer el efecto sobre el medio ambiente de la venta de gasolina mezclada con etanol en las estaciones de servicio en esta ciudad, con todas las consecuencias de contaminación y calidad de aire que recaen sobre los habitantes y ecosistemas capitalinos. Sin información confiable, los talleres tecnomecánicos tienen más difícil la labor de preparar los vehículos para cumplir las regulaciones ambientales vigentes y al variar los porcentajes de la mezcla del combustible algunos vehículos que cumplían las normas vigentes con gasolina podrían verse afectados negativamente pasando a no cumplir con los requisitos, viéndose afectada la economía de los ciudadanos, ya sea por el arreglo necesario al vehículo o el comparendo y todas sus implicaciones por incumplir las regulaciones.

En Colombia la regulación de emisiones para vehículos a gasolina es realizada de acuerdo a la NTC 4983, según la cual las mediciones se realizan en dos condiciones: ralentí que es la mínima velocidad para que el motor continúe

encendido sin carga y a velocidad de crucero, que consiste en mantener 2500 ± 250 RPM sin carga en el motor [2], dos condiciones que distan de la condición normal de operación de un vehículo con la carga normal de trabajo. La medición de emisiones sin carga no representa las emisiones reales producidas por un vehículo en operación y por esto no es recomendable [3]. Los métodos de prueba más cercanos a las condiciones reales de operación son los métodos directos de medición: Sensor remoto, Medición a bordo y Prueba en dinamómetro, donde la característica común a los métodos es que el vehículo es probado con una carga de trabajo, la carga real de operación para los dos primeros y una carga conocida para el dinamómetro, en procedimientos de acuerdo a la norma estadounidense de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos US-EPA por sus siglas en inglés [4]. El dinamómetro entrega los resultados de emisiones en términos de masa por unidad de energía [4], dando una perspectiva mucho mejor del proceso real ocurrido dentro del motor, pues los métodos donde sólo se mide el porcentaje en volumen de la emisión como en la NTC 4983 [2] son difícilmente comparables ya que no guardan relación alguna con el consumo de combustible.

Algunos vehículos no son aptos para operar con mezclas gasolina-etanol con etanol superior a determinado porcentaje, por lo que la regulación de venta de combustible oxigenado debe tener en cuenta también el requerimiento de motores tipo flex-fuel o para combustible flexible a los fabricantes, ensambladores e importadores de vehículos al mercado nacional. Los vehículos diseñados para mezclas de gasolina-etanol con alto contenido de etanol pueden presentar dificultades operando con gasolina pura. Por estos motivos es necesario un estudio antes de modificar la legislación vigente acerca de venta de combustibles oxigenados, pues son muchas las implicaciones de un cambio en la mezcla comercializada para el país, tanto para los usuarios finales de los vehículos como para todas las empresas que trabajan en el sector automotriz, incurriendo en costos e infraestructuras muy grandes y a escala nacional.

La adecuación de procesos y normatividad para el uso de una mezcla óptima de gasolina-etanol en términos de eficiencia energética, minimizando emisiones al ambiente, debe ser un proceso gradual y por lo tanto con proyecciones a corto, mediano y largo plazo. En un proceso como este no se debe improvisar y para hacer una planeación pertinente y acorde con la realidad son indispensables datos confiables en el entorno específico del proceso. Las experiencias de otros países con mezclas gasolina-etanol en sitios con diferente altura sobre el nivel del mar, diferente calidad en los combustibles y motorización de vehículos diferente, tan

solo presentan un punto de partida para las investigaciones propias, pero los resultados obtenidos en dichas investigaciones no serán válidos para la ciudad de Bogotá, que a 2015 contaba con 7'878.783 habitantes, siendo la ciudad más poblada de Colombia [5], por lo cual los datos propios de esta ciudad son indispensables para obtener un panorama nacional.

Para la Fundación Universitaria Los Libertadores resulta importante auspiciar y desarrollar este tipo de investigaciones, ya que aportan al reconocimiento institucional como ente investigador, a la ciudad y al país en general, contribuyendo a la expansión y desarrollo de la capacidad investigativa de sus docentes y estudiantes, a la búsqueda de elementos que aporten positivamente en la construcción de políticas públicas y normatividad adecuadas, y al mejoramiento de la calidad de vida y conservación del medio ambiente. Contando con las líneas activas de investigación donde este proyecto encaja perfectamente, en este caso Calidad Ambiental y Producción más Limpia, se tiene una oportunidad para trabajar en investigación en la institución y producir conocimiento a través de publicaciones como es el objetivo del proyecto ya aprobado y con ejecución actualmente en marcha: Evaluación de las emisiones reguladas de un motor de combustión interna (MCI) encendido por chispa en la ciudad de Bogotá, operando con mezclas de gasolina-etanol anhidro, proyecto perteneciente al grupo de investigación GIDAD Mecánica, en el semillero de motores, donde este trabajo de grado tiene su origen.

2.3 PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

De las mezclas gasolina-etanol consideradas, ¿qué porcentaje de etanol en la mezcla genera las menores emisiones específicas reguladas en un motor de combustión interna encendido por chispa en la ciudad de Bogotá?

3. MARCO DE REFERENCIA

Esta investigación está concebida en el marco de conceptos teóricos del funcionamiento de un motor de combustión interna, incluyendo los combustibles utilizados y las emisiones contaminantes derivadas de su funcionamiento, al igual que la reglamentación vigente en Colombia para el funcionamiento de estos motores y sus combustibles.

3.1 MARCO TEÓRICO

Los conceptos de ingeniería desarrollados por diferentes autores en el campo de motores de combustión interna a través de la historia se presentan de forma resumida en esta sección, enfocándolos al campo de aplicación y alcance del presente trabajo.

3.1.1 FUNCIONAMIENTO DE UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA ENCENDIDO POR CHISPA (MCI-EP)

Un **motor de combustión interna** (MCI) es una máquina térmica que convierte energía química de un combustible en energía térmica por combustión u oxidación con aire dentro del motor; esta energía térmica aumenta la temperatura y presión de los gases dentro del motor y esta presión realiza un trabajo sobre el motor cuyo mecanismo la convierte en energía mecánica disponible a través de la rotación de un eje. Un motor es de **encendido por chispa** o **encendido provocado** (EP) cuando en cada ciclo de trabajo un sistema produce un arco eléctrico de alto voltaje (chispa) dentro de la cámara, iniciando el proceso de combustión de la mezcla aire-combustible. Un motor de pistones de cuatro tiempos realiza 4 movimientos de pistón en dos revoluciones del motor por cada ciclo en las fases de admisión, compresión, expansión y escape. Cuando el motor cuenta con un solo pistón y un cilindro, se denomina monopistón o de cilindro sencillo. Cuando las válvulas se encuentran sobre el cilindro se denomina con válvulas sobre la cabeza (Overhead valves, OHV por sus siglas en inglés). La admisión de aire cuando ningún sistema aumenta la presión o caudal se denomina motor de aspiración natural o atmosférico. Cuando el sistema es enfriado por la circulación de aire alrededor del disipador del cilindro se denomina enfriado por aire. Si la mezcla de aire-combustible se realiza en un carburador (dispositivo que mezcla aire y combustible por efecto Venturi) se denomina motor carburado. El volumen

de desplazamiento o cilindrada del motor es la diferencia entre el volumen máximo de la cámara de combustión y el volumen mínimo; la relación de compresión de un motor es la relación entre el volumen máximo y el volumen mínimo y se expresa usualmente como $x:1$ donde x es la relación de compresión y se interpreta como “el motor comprime x veces la mezcla aire-combustible” con valores típicos para encendido por chispa entre 8:1 y 12:1 [6] [7].

El funcionamiento de un MCI-EP de aspiración natural, cilindro sencillo, carburado y de ciclo de cuatro tiempos comienza en la etapa de admisión, donde el pistón se desplaza desde el punto muerto superior (PMS) hasta el punto muerto inferior (PMI) con la válvula de admisión abierta y la válvula de escape cerrada. Esto aumenta el volumen de la cámara de combustión y crea una presión de vacío dentro, lo cual mueve el aire hacia el cilindro a través del sistema de admisión, donde se adicionan partículas de combustible al aire al pasar por el carburador [6].

En la etapa de compresión cuando el pistón llega al PMI la válvula de admisión se cierra y el pistón vuelve al PMS. Esto comprime la mezcla aire-combustible aumentando presión y temperatura en el cilindro. Cerca del final de la carrera de compresión la chispa eléctrica es disparada y se inicia la combustión [6].

La etapa de expansión comienza con la combustión de la mezcla aire-combustible cerca del PMS, la combustión cambia la composición de la mezcla de gases a los productos de escape, incrementando la temperatura en el cilindro a un pico muy alto, lo cual aumenta la presión en el cilindro también a un pico muy alto. Como todas las válvulas están cerradas la alta presión empuja el pistón lejos del PMS, lo que produce el trabajo de salida del motor; mientras el pistón se mueve del PMS al PMI el volumen del cilindro aumenta, causando que la presión y temperatura disminuyan [6].

La etapa de escape comienza cuando el pistón está cerca del PMI y se abre la válvula de escape, la presión y temperatura en el cilindro son aún mayores que en los alrededores, por lo cual al abrir la válvula la diferencia de presiones empuja fuera del cilindro muchos de los gases calientes de escape a través del sistema de escape. El pistón llega al PMI y se desplaza al PMS empujando la mayoría de los gases de escape que aún se encuentran en la cámara de combustión a través del sistema de escape. Cerca del final de la etapa de escape la válvula de admisión se comienza a abrir y está completamente abierta cuando el pistón alcanza el PMS y comienza el siguiente ciclo [6].

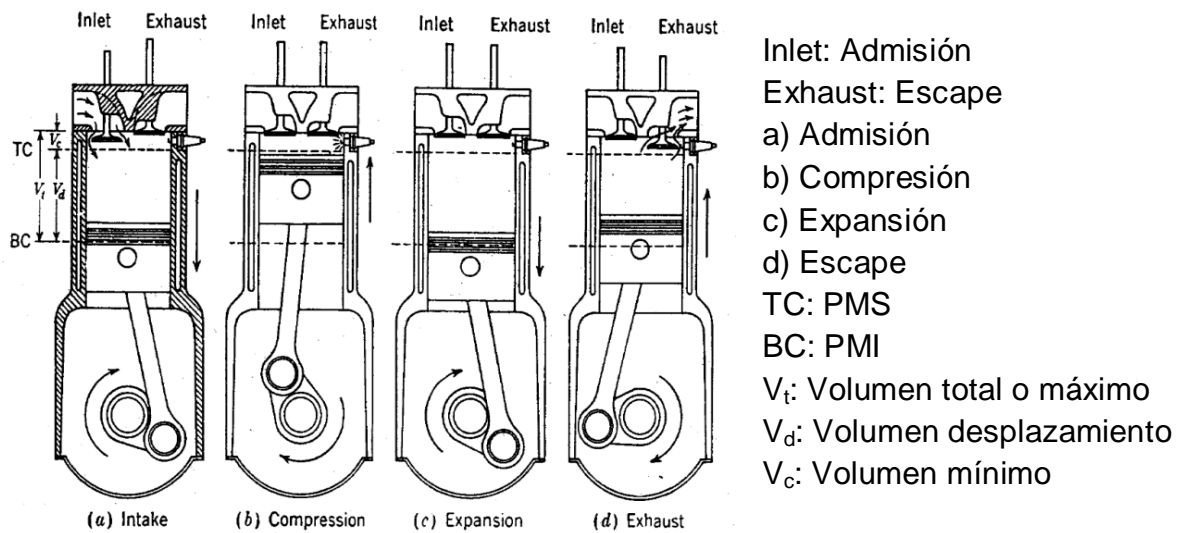


Gráfico 1 - Ciclo de operación de un motor de 4 tiempos encendido por chispa. De Heywood [7].

3.1.2 COMBUSTIBLE

Un combustible es una sustancia capaz de oxidarse rápidamente, trasformando la energía almacenada en enlaces químicos a energía térmica en forma de calor [8].

Una de las propiedades importantes para un combustible a utilizar en un MCI-EP es el octanaje, propiedad que describe el comportamiento de un combustible en cuanto a autoencendido por efecto de la presión, que durante la etapa de compresión incrementa la temperatura en la cámara de combustión. Si la temperatura en la cámara supera la temperatura de auto-ignición (SIT por sus siglas en inglés) la mezcla aire-combustible comenzará su reacción de combustión antes de que la chispa la inicie en el momento correcto, efecto que es altamente perjudicial para la combustión, la salida de potencia y la vida del motor [6].

El octanaje se determina comparando las características antidetonantes del combustible con iso-octano, al cual se le asigna el valor 100 por su alta resistencia a la auto-ignición y el n-heptano, al cual se le asigna el valor 0 por su baja resistencia a la auto-ignición. Hay varios métodos para determinar el octanaje, los más comunes son octanaje de investigación (RON por sus siglas en inglés) y octanaje de motor (MON por sus siglas en inglés) cuyos métodos de medición están normalizados por las normas ASTM D-2699 y ASTM D-2700, respectivamente [7] [6].

3.1.2.1 Gasolina: El combustible más ampliamente utilizado en MCI es la gasolina, la cual se obtiene por destilación del petróleo bruto que se extrae de la naturaleza y se considera un recurso no renovable. Para destilar el petróleo, se calienta progresivamente para vaporizar los diferentes hidrocarburos según sus distintas temperaturas de ebullición. El primer producto, mezcla de líquidos A y B (llamados éter y esencia de petróleo) es lo que se denomina gasolina; según la proporción tiene diferentes densidades; es un líquido incoloro o ligeramente amarillento, de gran poder calorífico, inflamable y, en estado de vapor mezclado con aire, explosivo [9].

Composición química: a base de carbono e hidrógeno en diferentes combinaciones, contiene entre 84 y 87% de carbono, entre 11 y 14% de hidrógeno, 3% de oxígeno, 1% de azufre y 0,5% de nitrógeno, como componentes más importantes [9].

3.1.2.2 Etanol anhidro: El etanol es un alcohol que cuenta con dos carbonos en su estructura y un grupo OH, con fórmula química C_2H_5OH [6]. El etanol anhidro o deshidratado es etanol que no tiene en suspensión partículas de agua o tiene muy poca concentración de agua, menor a 0,5% [10]. El etanol anhidro se caracteriza por ser compatible para mezclar con gasolinas en cualquier proporción para producir un combustible oxigenado con mejores características [1]. El etanol es uno de los compuestos de hidrocarburos comunes derivados del petróleo [6] que también puede producirse como biocombustible de origen vegetal a partir de granos y productos ricos en azúcares, por lo que es un recurso renovable [6] [10].

3.1.2.3 Mezcla gasolina-etanol: Respecto a la gasolina, el alcohol como combustible tiene algunas ventajas: [6]

- Puede ser obtenido de varias fuentes, naturales y manufacturadas.
- Tiene un alto octanaje, lo cual permite motores más eficientes con mayores relaciones de compresión. Mientras el octanaje de investigación de la gasolina está entre 91 y 99 el del etanol es 107. El octanaje de motor de la gasolina está entre 82 y 89 el del etanol es 89 [6] [7]. Aunque el comportamiento del octanaje no es lineal [11] el etanol presenta un octanaje igual o superior a la gasolina y la mezcla gasolina-etanol conserva esta tendencia de acuerdo al porcentaje de la mezcla.
- Produce menores emisiones globalmente. Hsieh et. al. [12] Midieron experimentalmente reducciones de las emisiones de CO del 10 al 90% en

volumen y HC del 20 al 80% en volumen, y un aumento en CO₂ entre el 5 y el 25% en volumen dependiendo de las condiciones del motor.

- Tiene un alto enfriamiento de evaporación, lo que resulta en una admisión y compresión más frías. Esto aumenta la eficiencia volumétrica del motor y reduce el trabajo de entrada requerido para compresión.
- Tiene un bajo contenido de azufre.

No obstante, guarda algunas desventajas: [6]

- Menor energía contenida en el combustible, lo que significa que es necesario quemar más alcohol que gasolina para obtener la misma energía, lo que no afecta la potencia del motor puesto que al contener oxígeno necesita menos aire para la combustión ideal (estequiométrica) y puede ser quemado más combustible en cada ciclo.
- Produce más aldehídos en el escape.
- El alcohol es más corrosivo que la gasolina.
- Pobre encendido en clima frío.
- Características pobres de ignición en general.
- Produce llama invisible, lo que representa mayor peligro de incendios.
- Peligro de inflamación de tanques de almacenamiento debido a que la baja presión de vapor permite entradas de aire al depósito.
- Bajas temperaturas de llama producen menos NO_x pero toma más tiempo calentar el catalizador hasta una temperatura adecuada de operación.
- El olor puede producir jaquecas y mareo en algunas personas.
- Puede producir vapor en el sistema de combustible.

Con la mezcla de gasolina-etanol se solucionan varios de los problemas de utilizar alcohol puro sin sacrificar las ventajas. Una de las mezclas más usuales es E10, que consiste en 10% de etanol y 90% de gasolina en volumen, importante porque puede utilizarse en cualquier motor de gasolina sin una adecuación previa. La otra mezcla ampliamente utilizada es E85, 85% de etanol y 15% de gasolina, con la cual se evitan o reducen muchas desventajas de utilizar etanol puro (E100) manteniendo al mínimo la gasolina requerida [6].

De manera general las mezclas de gasolina-etanol se nombran E%, donde se menciona el porcentaje de etanol y el resto es gasolina. La gasolina pura se nombra como E0 y el etanol puro como E100.

3.2 MARCO CONCEPTUAL

En esta sección se encontrarán los conceptos base para la descripción matemática de los fenómenos ocurridos en el funcionamiento de un motor de combustión interna y sus productos de escape, de tal manera que sean cuantificables y comparables a partir de dicha cuantificación. Aunque los diferentes autores presentan los mismos conceptos, las nomenclaturas utilizadas varían mucho, razón por la cual se seguirá la nomenclatura presentada por Pulkrabek [6].

3.2.1 DESEMPEÑO EN MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

3.2.1.1 Potencia Indicada: es la que se calcula a partir del trabajo generado en el diagrama P - v :

$$W = \int F dx = \int P \cdot A_p dx \quad [J](1)$$

Donde W es el trabajo realizado, F es la fuerza producida, dx es la distancia recorrida. Como fuerza es área por presión se reemplazan: P es la presión, A_p es el área del pistón, Luego:

$$W = \int P dV \quad [J](2)$$

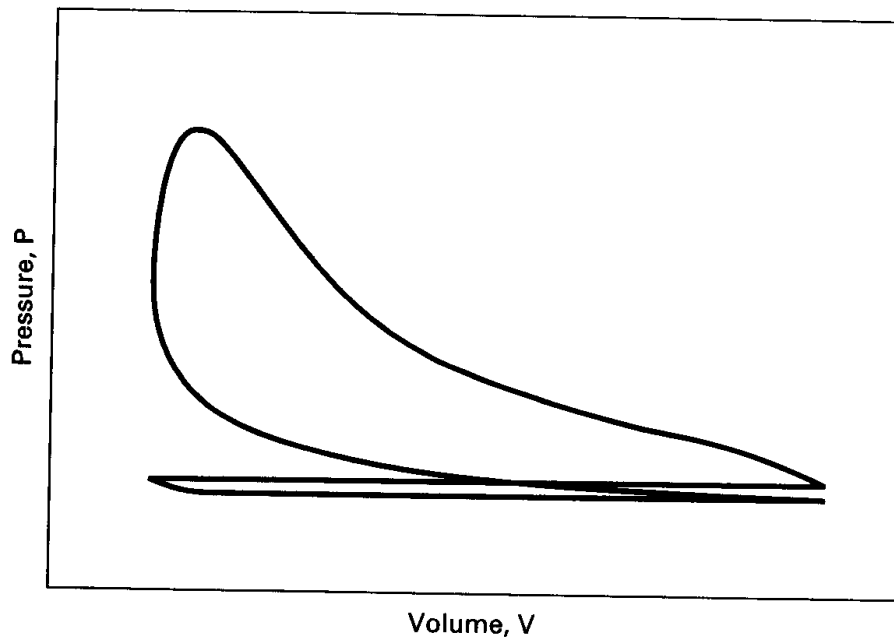


Gráfico 2 - Diagrama P - V típico de un motor de combustión interna de cuatro tiempos. De Pulkrabek [6].

Es conveniente expresar Ec.2 en términos de masa por lo que se reemplaza trabajo por trabajo específico $w_i=W/m$ y volumen por volumen específico $v=V/m$

$$w_i = \int P dv \quad \left[\frac{J}{kg} \right] (3)$$

Donde el trabajo específico es igual al área bajo la curva en el proceso $P-v$. w_i se denomina trabajo indicado.

El trabajo de freno w_b es el trabajo disponible en el eje de salida del motor

$$w_b = w_i - w_t \quad \left[\frac{J}{kg} \right] (4)$$

Donde w_t es el trabajo específico perdido debido a fricción y cargas parasitas

La eficiencia mecánica se define como:

$$\eta_m = w_b/w_i = W_b/W_i \quad (5)$$

Donde η_m es la eficiencia mecánica.

La presión media efectiva mep (por sus siglas en inglés) se define como:

$$mep = w/\Delta_v = W/V_d \quad [Pa] (6)$$

Donde w es el trabajo específico de un ciclo, V_d es el volumen de desplazamiento y W es el trabajo de un ciclo.

Se definen entonces la mep al freno ($bmep$ por sus siglas en inglés) y mep indicada ($imep$ por sus siglas en inglés) de la siguiente manera:

$$bmep = w_b/\Delta_v \quad [Pa] (7)$$

$$imep = w_i/\Delta_v \quad [Pa] (8)$$

Teniendo que la eficiencia mecánica las relaciona de la siguiente manera:

$$bmep = \eta_m \cdot imep \quad [Pa] (9)$$

Se define potencia como trabajo por unidad de tiempo:

$$\dot{W} = W \cdot N/n \quad [W] (10)$$

Y para un motor de cuatro tiempos:

$$\dot{W} = (mep) \cdot A_p \overline{U_p} / 4 \quad [W] (11)$$

Donde n es el número de revoluciones por ciclo, N es la velocidad del motor, W es el trabajo por ciclo, A_p es el área de todos los pistones y U_p es la velocidad promedio del pistón.

$$\dot{W}_b = \eta_m \cdot \dot{W}_i \quad [W] (12)$$

Donde \dot{W}_b es la potencia al freno y \dot{W}_i es la potencia indicada [6] [7].

3.2.1.2 Relación aire combustible: se define:

$$AF = m_a/m_f = \dot{m}_a/\dot{m}_f \quad (13)$$

Donde AF es la relación aire/combustible, m_a es la masa de aire, m_f es la masa de combustible, \dot{m}_a es el flujo másico de aire y \dot{m}_f es el flujo másico de combustible [6] [7].

3.2.1.3 Consumo de combustible específico: se define como:

$$sfc = \dot{m}_f/\dot{W} \quad [g/kWh] \quad (14)$$

Donde sfc es el consumo específico de combustible (por sus siglas en inglés), definiendo también el consumo específico de combustible al freno $bsfc$ (por sus siglas en inglés) y el consumo específico de combustible indicado $isfc$ (por sus siglas en inglés) [6] [7].

$$bsfc = \dot{m}_f/\dot{W}_b \quad [g/kWh] \quad (15)$$

$$isfc = \dot{m}_f/\dot{W}_i \quad [g/kWh] \quad (16)$$

3.2.1.4 Eficiencias del motor:

El calor de entrada se define como:

$$Q_{in} = m_f Q_{HV} \eta_c \quad [J] \quad (17)$$

Y para estado estacionario:

$$\dot{Q}_{in} = \dot{m}_f Q_{HV} \eta_c \quad \left[\frac{J}{s} \right] \quad (18)$$

Donde η_c es la eficiencia de combustión, definida como la fracción de combustible que se quema, W es el trabajo por ciclo, \dot{W} la potencia, m_f la masa de combustible por ciclo, \dot{m}_f el flujo másico de combustible, Q_{HV} es el poder calorífico del combustible y η_f la eficiencia de combustible. Se define la eficiencia térmica como:

$$\eta_{th} = W/Q_{in} = \dot{W}/\dot{Q}_{in} = \dot{W}/\dot{m}_f Q_{HV} \eta_c = \eta_f/\eta_c \quad (19)$$

La eficiencia volumétrica se define como:

$$\eta_v = m_a / \rho_a V_d = n \dot{m}_a / \rho_a V_d N \quad (20)$$

Donde m_a es la masa de aire en el motor por un ciclo, \dot{m}_a es el flujo másico de aire al motor en estado estacionario, ρ_a es la densidad del aire, V_d es el volumen de desplazamiento, N es la velocidad del motor y n es el número de revoluciones por ciclo [6] [7].

3.2.2 EMISIONES DE UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA

Las emisiones reguladas de un motor de combustión interna son NO_x , CO, CO_2 y HC. Dos métodos comunes de medición de estas emisiones son como emisiones específicas y como índice de emisión:

Donde se definen las emisiones específicas como flujo másico de emisión sobre potencia al freno por las siglas en inglés, así:

$$BSNO_x = \frac{\dot{m}_{NO_x}}{\dot{W}_b} \quad [g/kWh] \quad (21)$$

$$BSCO = \frac{\dot{m}_{CO}}{\dot{W}_b} \quad [g/kWh] \quad (22)$$

$$BSCO_2 = \frac{\dot{m}_{CO_2}}{\dot{W}_b} \quad [g/kWh] \quad (23)$$

$$BSHC = \frac{\dot{m}_{HC}}{\dot{W}_b} \quad [g/kWh] \quad (24)$$

Siendo $BSXX$ la emisión específica al freno de la especie XX y \dot{m}_{xx} el flujo másico de la especie XX [6]. El índice de emisiones se define como el flujo másico de emisión en gramos por segundo sobre el flujo másico de combustible en kilogramos por segundo:

$$EINO_x = \dot{m}_{NO_x} / \dot{m}_f \quad (25)$$

$$EICO = \dot{m}_{CO} / \dot{m}_f \quad (26)$$

$$EICO_2 = \dot{m}_{CO_2} / \dot{m}_f \quad (27)$$

$$EI_{HC} = \dot{m}_{HC} / \dot{m}_f \quad (28)$$

Siendo EI_{XX} el índice de emisión de la especie XX por sus siglas en inglés [7] [6] [11].

3.3 MARCO LEGAL

Las referencias legales que rigen, reglamentan y dan pautas para la producción, almacenamiento, distribución, venta y uso de los combustibles y emisiones producto de motores de combustión interna se presentan en esta sección.

3.3.1 LEY 1715 DE 2014

Publicada en el Diario Oficial No. 49.150, de 13 de mayo de 2014. La Ley 1715 de 2014 regula la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional, donde son de especial interés para el presente trabajo los siguientes apartados:

Artículo 1º. Objeto: La ley tiene por objeto promover el desarrollo y utilización de las fuentes no convencionales de energía, principalmente aquellas de carácter renovable, como medio necesario para la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

Artículo 2º. Finalidad de la ley: La finalidad de la presente ley es establecer el marco legal y los instrumentos de promoción del aprovechamiento de las fuentes no convencionales de energía, principalmente aquellas de carácter renovable, lo mismo que para el fomento de la inversión, investigación y desarrollo de tecnologías limpias para la producción de energía y la eficiencia energética. También son finalidad estimular la inversión, la investigación y el desarrollo para la producción y utilización de energía a partir de fuentes no convencionales de energía, principalmente aquellas de carácter renovable, mediante el establecimiento de incentivos tributarios, arancelarios o contables y demás mecanismos que estimulen el desarrollo de tales fuentes en Colombia.

Artículo 6º. Competencias administrativas: Corresponde al Gobierno Nacional, a través del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible fomentar las actividades de investigación científica, desarrollo tecnológico e innovación de interés, en el campo de las energías renovables y del ahorro y la eficiencia energética.

Artículo 11°. Incentivos a la generación de energías no convencionales. Los obligados a declarar renta que realicen directamente inversiones en fuentes no convencionales de energía tendrán derecho a reducir anualmente de su renta, por los 5 años siguientes al año gravable en que hayan realizado la inversión, el cincuenta por ciento (50%) del valor total de la inversión realizada. Para los efectos de la obtención del beneficio tributario, la inversión causante del mismo deberá obtener la certificación de beneficio ambiental por el Ministerio de Ambiente y ser debidamente certificada como tal por el Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible.

Artículo 44°. Emisiones y vertidos de las instalaciones de fuentes no convencionales de energía: Los límites de emisiones o vertimientos establecidos para las instalaciones de fuentes no convencionales de energía en ningún caso podrán ser más rigurosos que los límites establecidos en el caso menos exigente aplicado a fuentes de energía convencionales.

3.3.2 LEY 693 DE 2001

Publicada en el Diario Oficial No. 44.564, de 27 de septiembre de 2001. La ley 693 de 2001 establece las normas para el uso de alcoholes carburantes en Colombia. Para el interés del presente trabajo se resalta el Artículo 1°. Las gasolinas utilizadas en centros urbanos de más de 500.000 habitantes tendrán que contener componentes oxigenados tales como alcoholes carburantes, en la cantidad y calidad que establezca el Ministerio de Minas y Energía, de acuerdo con la reglamentación sobre control de emisiones que establezca el Ministerio del Medio Ambiente. En los centros urbanos con menos de 500.000 habitantes el Gobierno podrá implementar el uso de estas sustancias.

3.3.2.1 Resolución 180687 de 2003. Expide la regulación técnica prevista en la Ley 693 de 2001, en relación con la producción, acopio, distribución y puntos de mezcla de los alcoholes carburantes y su uso en los combustibles nacionales e importados. Para el presente trabajo es de especial interés el Artículo 7, que determina que el porcentaje de etanol anhidro en volumen a 60° Fahrenheit (15,56 °C) a utilizar en la mezcla con gasolina básica será de $10 \pm 0,5$. Este porcentaje podrá ser modificado previa reglamentación de los Ministerios de Minas y Energía y de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial y de acuerdo con la producción y disponibilidad nacional del componente oxigenante [1].

3.4 ESTADO DEL ARTE

Algunos estudios realizados sobre emisiones reguladas utilizando mezcla gasolina-etanol en motores de combustión interna de encendido por chispa nos muestran los siguientes resultados:

Costa y Sodré [13] investigaron en Brasil en 2009 las emisiones y desempeño comparando E22 con etanol hidratado, encontrando que el uso de etanol hidratado genera menores emisiones de CO y HC mientras que genera mayores de CO₂ y NO_x.

Yücesu et. al. [14] investigaron en Turquía en 2006 el efecto de la mezcla gasolina-etanol en el desempeño y emisiones de escape a diferentes relaciones de compresión, utilizando E0, E10, E20, E40 y E60, encontrando que los combustibles E40 y E60 tienen efectos importantes en la reducción de las emisiones de escape, con un máximo de reducción a 2000 RPM del motor. La reducción promedio encontrada fue 11% con E40 y 10.8% con E60. La mayor disminución fue de HC comparada con CO. La máxima disminución de emisiones de HC fue obtenida utilizando E60 con un promedio de 16.45% a 5000 RPM.

Hsieh et. al. [12] investigaron en Taiwán en 2001 el desempeño y las emisiones contaminantes de un motor encendido por chispa utilizando mezcla gasolina-etanol, utilizando E0, E5, E10, E20 y E30, encontrando que las emisiones de CO disminuyen entre 10 y 90% y las de HC disminuyen entre 20 y 80% mientras que las de CO₂ aumentan entre 5 y 25%. Las emisiones de NO_x alcanzaron un máximo cerca de la relación estequiométrica, dependiendo más de la condición de funcionamiento del motor que del contenido de etanol en la mezcla.

Celik [15] investigó en Turquía en 2008 la determinación experimental de mezcla gasolina-etanol sustentable para un motor a gasolina de alta relación de compresión, utilizando las mezclas E25, E50, E75 y E100 a velocidad constante de 2000 RPM, encontrando que las emisiones de CO, CO₂, Hc y NO_x se reducen cerca de 53%, 10%, 12% y 19% respectivamente utilizando E50, siendo ésta la mejor mezcla de las probadas para las condiciones de operación.

Turner et. al. [16] investigaron en el Reino Unido en 2011 la eficiencia de combustión del bio-etanol a varias mezclas en un motor de inyección directa a gasolina, utilizando E0, E10, E20, E30, E50, E85 y E100, encontrando reducción

de emisiones de NOx similares y reducción de emisiones de CO con mejor eficiencia de combustión.

Wu et. al. [17] investigaron en el Reino Unido en 2011 la inyección dual: el concepto de biocombustible flexible para motores encendidos por chispa alimentados con varias mezclas de gasolina y biocombustibles, utilizando E0 y E100 a 1500 RPM, encontrando que las emisiones de HC, NOx y CO2 son mayoritariamente reducidas con la estrategia de inyección dual.

Ozsezen y Canakci [18] investigaron en Turquía en 2011 el desempeño y las características de combustión de mezclas gasolina-etanol con la válvula reguladora del carburador completamente abierta, utilizando E5 y E10, encontrando una reducción en las emisiones de HC e incremento en las de CO aumentando la velocidad del vehículo. No fue trazable el comportamiento de CO2 pero un incremento de NOx a baja velocidad y disminución a alta fue observado.

Zhuang y Hong [19] investigaron en Australia en 2012 el efecto de palanca utilizando etanol en la reducción de consumo de gasolina, encontrando que la emisión de NOx disminuye y las de CO y HC aumentan con el aumento del contenido de etanol. El BSCO para baja carga es menor hasta una mezcla de E48, el BSHC y BSNOx tienen el mismo comportamiento para las condiciones de carga; se incrementan hasta una mezcla E24 y para porcentajes más altos disminuyen.

Balki et. Al. [20] investigaron en Turquía en 2014 el efecto de diferentes alcoholes de combustibles en el desempeño, las emisiones y las características de combustión en un motor a gasolina, utilizando E0 y E100, encontrando reducciones en las emisiones de NOx de 47.6%, HC de 19.13% y CO de 21.6% y aumento en las emisiones de CO2 de 2.51% al utilizar E100 en comparación con E0.

Topgül et. al. [21] investigaron en Turquía en 2006 los efectos de la mezcla gasolina-etanol sin plomo y los tiempos de ignición en el desempeño y emisiones de escape, utilizando E0, E10, E20, E40 y E60, encontrando que la mezcla E40 produce los mejores resultados en reducción de emisión de CO en 31.8% con una relación de compresión de 9:1. La mezcla E60 redujo las emisiones de CO en 19.8% a 8:1 y 22.3% a 9:1. La mezcla E60 reduce la emisión de HC en 31.45% a relación de compresión de 10:1.

Schifter et. al. [22] investigaron en México en 2011 el comportamiento de la combustión y emisiones para la mezcla gasolina-etanol y un motor de un solo cilindro, utilizando E0, E6, E10, E15 y E20, encontrando disminución en las emisiones de CO en 52% y de HC en 19%. La mezcla E20 mostró una reducción media del 13.6% en contenido de CO y un aumento en los HC y NOx de alrededor del 5%. La mezcla E15 presentó la misma tendencia con reducciones del 7.4% de CO. Para mezclas con menor contenido de etanol no se observaron variaciones respecto a E0.

Zhang et. al. [23] investigaron en China en 2014 la combustión y el número de emisiones de partículas en un motor encendido por chispa de inyección directa operando con mezclas gasolina etanol y gasolina - n-butanol con recirculación de los gases de escape, utilizando E10 y E20, encontrando que con un 20% de recirculación de gases de escape las emisiones de HC aumentan de 31% a 60% para la gasolina, mientras que para la mezcla gasolina-etanol es completamente diferente. Con E20 las proporciones de HC están 11.1% por debajo que las de E0.

Costagliola et. al. [24] investigaron en Italia en 2013 la eficiencia de combustión y las emisiones de un motor encendido por chispa alimentado con mezcla gasolina-etanol, utilizando E0, E10, E20, E30 y E85, encontrando la mayor reducción de emisiones utilizando E85 con THC reducidos en 20% y las emisiones de Co y NOx reducidas en 15%.

Hakan [25] investigó en Turquía en 2005 el uso teórico y experimental de mezcla gasolina-etanol en motores encendidos por chispa, encontrando que el uso de mezcla gasolina-etanol en motores encendidos por chispa reduce significativamente la concentración de CO en las emisiones, un 44.26% en fracciones molares para una relación de compresión de 7:75:1 y en 41.67% para 8.25, sin embargo la concentración de NOx aumenta. También se determinó que los motores de combustión interna pueden operar con mezclas gasolina-etanol hasta del 16.5% sin modificaciones al motor o sistema de combustible.

Chen et. al. [26] investigaron en China en 2012 un estudio de preparación de mezclas y emisiones de material particulado utilizando un motor de inyección directa alimentado con mezclas estequiométricas de gasolina-etanol, utilizando E0, E10, E20, E50, E70 y E85 bajo dos condiciones de temperatura diferentes, encontrando que al aumentar el porcentaje de etanol aumenta el número de partículas y en la masa de las partículas con tamaño en el rango entre 23 a 700

nm. La variabilidad de la concentración de HC es mayor normalmente en condiciones de baja temperatura que en alta temperatura.

He et. al. [27] investigaron en China en 2003 un estudio de las emisiones características en un motor de inyección electrónica de combustible operando con mezclas gasolina-etanol, utilizando E0, E10, E30 y E85, encontrando que a carga completa a 2000 RPM las mezclas E10 y E30 presentan una disminución de las emisiones de CO respecto a E0 de 4.7% y 5.8% respectivamente. En condiciones de operación las mezclas de gasolina-etanol disminuyen ligeramente las emisiones de CO y NO_x, pero pueden disminuir significativamente la salida de emisiones THC. Mientras que la mezcla E10 tiene un efecto pequeño en la reducción de emisiones de CO, THC y NO_x la mezcla E30 puede reducirlas drásticamente.

Al-Hasan [28] investigó en Jordania en 2003 el efecto de mezclas gasolina-etanol sin plomo en el desempeño de motores y emisiones de escape, utilizando E2.5, E5, E7.5, E10, E12.5, E15, E17.5, E20, E22.5, E25 y E27.5, encontrando que el usar mezclas gasolina-etanol sin plomo genera una reducción significativa en las emisiones de escape, cerca de 46.5% para CO y 24.3% para HC para todas las velocidades del motor, sin embargo las emisiones de CO₂ incrementan alrededor de 7.5%.

Gravalos et. al. [29] investigaron en Grecia en 2013 las emisiones características de los motores encendidos por chispa operando con mezclas de baja y alta masa molecular de alcohol y gasolina, utilizando E10, E15, E20, E25 y E30, encontrando que las emisiones de escape de CO y HC producidas con mezcla gasolina-alcohol son menores que para la gasolina pura, con una reducción mayor cuanto mayor es el porcentaje de etanol. Las emisiones de CO₂ tienen unos comportamientos opuestos comparados con las emisiones de CO. Las emisiones de NO_x fueron mayores con mezcla de baja y alta masa molecular de alcohol y gasolina que con gasolina pura. Para la mezcla E25 las emisiones de HC bajaron 20.4% respecto a las emisiones de E0.

Graham et. al. [30] investigaron en Canadá en 2008 las emisiones de vehículos de trabajo ligero a gasolina operando en mezclas bajas de gasolina etanol y E85, utilizando E20 y E85, encontrando para E20 una reducción estadísticamente significativa en las emisiones FTP compuestas de CO, incrementos estadísticamente significativos en las emisiones de NO_x. Para E85 se encontraron

disminuciones estadísticamente significativas en las emisiones de NO_x en un 45%, sin cambios estadísticamente significativos en las emisiones de CO y CO_2 .

Tavares et. al. [31] investigaron en Brasil en 2011 la evaluación de los gases contaminantes emitidos por vehículos alimentados con etanol y gasolina, utilizando E0 y E100, encontrando que las emisiones de NO_x producidas por motores a E100 fueron claramente menores pero las emisiones de SO_2 y CO no tuvieron una diferencia significativa.

Ghazikhani et. al. [32] llevaron a cabo en Irán en 2014 una investigación experimental de la temperatura de gases de escape y el efecto en la tasa de suministro en las emisiones y desempeño de un motor de dos tiempos a mezcla gasolina-etanol, utilizando E5, E10 y E15 a 2500, 3000, 3500 y 4500 RPM con cargas de 25, 50, 75 y 100%, encontrando que las emisiones de HC disminuyen 30% en promedio con el aumento de la temperatura de escape. Con los aumentos en la velocidad del motor aumentan las emisiones de CO, generalmente para diferentes condiciones de carga y velocidad las emisiones de CO disminuyen en promedio 35% y por cada aumento de 5% de etanol en la mezcla las emisiones de CO_2 disminuyen cerca de 6.3%. La mayor ventaja del uso de etanol en la mezcla es la reducción de emisiones de NO_x que son reducidas cerca de 83% cuando se utiliza E15 y un promedio de 38% en las demás mezclas.

Canakci et. al. [33] investigaron en Turquía en 2013 el impacto de los combustibles mezcla de gasolina-etanol en las emisiones de los gases de escape en un motor encendido por chispa, utilizando E0, E5 y E10, encontrando que las mezclas causan una disminución en las emisiones de CO de 18% para E5 y 17% para E10 y emisiones de HC de 27% para E5 y 32% para E10, a media velocidad, sin embargo el comportamiento no se mantuvo a mayor velocidad. Las emisiones de CO_2 y NO_x se redujeron a velocidad media en 11% y 15.5% respectivamente y 10.5% y 13.5% a velocidad mayor.

Karvalakis et. al. [34] investigaron en Estados Unidos en 2012 los impactos del nivel de combustible etanol en las emisiones contaminantes reguladas y no reguladas en una flota de vehículos de trabajo ligero a gasolina, utilizando E10, E20, E50 y E85, encontrando que las emisiones de CO se incrementaron para E85, pero no para las mezclas con menor contenido de etanol. El etanol no tuvo un impacto significativo en los motores más modernos, sin embargo los resultados experimentales muestran aumentos de emisiones NO_x con el aumento del contenido de etanol en motores más antiguos. Los motores más modernos no

mostraron cambio estadísticamente significativo con etanol. Las emisiones de CO₂ no mostraron cambios significativos con el combustible.

Paulopoulos et. al. [35] investigaron en Grecia en 2001 las emisiones reguladas y no reguladas de un motor de combustión interna operando con mezcla gasolina-etanol, utilizando E0, E3 y E10, encontrando una disminución en la emisión de CO en todo el rango de operación con el aumento de etanol.

Lee et. al. [36] investigaron en la República de Corea en 2009 las características de las emisiones de partículas de resolución temporal y distribución de tamaños durante las condiciones de operación dinámica operando con mezcla gasolina-etanol, utilizando E0, E10 y E85, encontrando que para la mezcla E10 las emisiones del motor THC bajaron un máximo de 20% y la concentración de NO_x se redujo un máximo de 30% comparado con E0. La formación de partículas es fuertemente dependiente del rango de velocidad del vehículo, para E85 son menores que E0 y E10 en condiciones de operación completamente calentado el motor y a alta velocidad.

Piamba y Arias [37] investigaron en Bogotá, Colombia en 2007 el desempeño de motor utilizando como combustible mezcla de etanol anhidro y gasolina en relación de 10% en volumen, utilizando E0 y E10 en un MCI con carburador en dinamómetro, encontrando una mayor potencia al freno, para la mezcla E10 un 3.6%, y un mayor par motor para E10, un 2.89%, un mayor consumo específico de combustible para E10, disminución de emisiones de HC para E10 de 77 ppm a potencia máxima y 236 ppm a torque máximo, aumento de emisiones de NO_x para E10 en 40 ppm para potencia máxima y 25 ppm para torque máximo, disminución de emisiones de CO para E10 en 20% para potencia máxima y 18% para torque máximo, aumento de emisiones de CO₂ para E10 en 11.5% para potencia máxima y 3.1% para torque máximo, emisiones de O₂ invariantes para potencia máxima y aumento para E10 en 33.3% para condiciones de torque máximo.

Higuera et. al. [38] recopilaron en Pereira, Colombia en 2007, antecedentes sobre biocombustibles en Colombia. Con la mezcla E10 la gasolina corriente aumenta en 3 su octanaje y la gasolina extra en 2 octanos. La legislación al respecto vigente en el país, donde destaca la ley 693 de 12 de septiembre del 2001, establece el uso de mezcla gasolina-etanol en centros urbanos, en 10% etanol y 90% gasolina (E10), fijada posteriormente por la resolución 181069 del 2005 del Ministerio de Minas y Energía.

Torres et. al. [39] realizaron en Bucaramanga, Colombia en 2002 un estudio de la mezcla de gasolina con 10% de etanol anhidro; evaluación de propiedades fisicoquímicas, estableciendo que la presión de vapor óptima de la gasolina base debe estar entre 46.18 y 47.56 kPa para que al realizar la mezcla E10 cumpla la regulación colombiana de 55 kPa. El índice antidetonante debe estar entre 75 y 76 para gasolina corriente y entre 84 y 85 para gasolina extra para que la mezcla cumpla la regulación de 81 para corriente y 87 para extra. El máximo contenido de agua recomendado para transporte y almacenamiento de la mezcla E10 es de 2000 ppm. El contenido de etanol en la gasolina colombiana mejora la calidad de ésta al reducir componentes perjudiciales por el efecto de dilución.

Gaviría et. al. [40] realizaron en Pereira, Colombia en 2010 un estudio del comportamiento de vehículos de carburador en inyección con mezclas gasolina-etanol, utilizando E10, E12 y E15 en vehículos de los años 1985 y 2010, encontrando que con estas mezclas no se presentan cambios en el comportamiento mecánico de los vehículos. Las emisiones de CO₂ mostraron una tendencia a incrementarse, las emisiones de HC y CO presentan tendencia a reducirse. Las emisiones de NO_x no muestran dependencia con la mezcla gasolina-etanol utilizada.

Las fuentes consultadas presentan diversos estudios realizados en el mundo, sin embargo la mayoría de ellos fueron realizados en condiciones muy diferentes a las condiciones ambientales de Bogotá, especialmente su altitud de 2600 metros sobre el nivel del mar, con la implicación en el nivel de oxígeno disponible y la presión atmosférica, por estos motivos los resultados de estudios similares realizados en otros lugares no son reproducibles y es necesario realizar mediciones directas para obtener información que permita abordar el tema ambiental en la ciudad de Bogotá.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

En esta sección se relacionan los implementos necesarios para llevar a cabo la investigación y la manera en que estos son utilizados, el presupuesto de los mismos y la metodología a seguir en el desarrollo del proyecto para alcanzar los objetivos propuestos.

4.1 MATERIALES Y EQUIPOS

Los materiales y equipos necesarios para la realización de este proyecto serán suministrados en su totalidad por la Fundación Universitaria Los Libertadores.

4.1.1 EQUIPOS

4.1.1.1 Banco flexible de pruebas: Para la realización de este proyecto es necesario un banco flexible de pruebas para motores de combustión interna, que cuente con las siguientes características

- Estructura base en acero estructural, con ruedas y soportes para los accesorios.
- Ducto de salida de gases.
- Analizador de gases Gasbox con sus respectivos filtros y soportes para uso portátil.
- Generador eléctrico operando a 3600 RPM con una salida de potencia de 10 kW.
- Banco de resistencias, con capacidad de 15 kW, operando con ajuste fino de 100 W.
- Encoder, abz/oc, eje 3/8", flanche, ip65, 7 pin END.
- Termo-higrómetro portátil, 10 a 95% humedad relativa, con un rango de 10 a 60 °C.
- Balanza digital.
- Tubo pitot con monómetro diferencial digital.
- Tarjeta de adquisición de datos Marca National Instruments.

4.1.1.2 Motor: El motor utilizado para las mediciones en este proyecto contará con las siguientes especificaciones

- Motor de combustión interna encendido por chispa.
- Monocilíndrico
- Válvulas sobre la cabeza (OHV).
- Cuatro tiempos.
- Enfriado por aire.
- Carburado.
- Aspiración atmosférica.
- Cilindrada de 242 cm³.
- Compresión 8,5:1.
- Potencia nominal de 5.9 kW (8 HP).

4.1.1.3 Computadores: Para el procesamiento de datos se utilizarán computadores propios o de los disponibles en los laboratorios de la Fundación Universitaria Los Libertadores, sin ninguna especificación particular.

4.1.2 MATERIALES Y SUMINISTROS

Los materiales necesarios para la realización del proyecto son los siguientes:

4.1.2.1 Papelería y fotocopias: Incluye todo lo necesario para impresiones de avances, artículos y fotocopias de documentos útiles para la investigación.

4.1.2.2 Elementos de protección personal: Incluye los elementos propios como overol y calzado de seguridad, y los elementos de seguridad disponibles en el taller de la Fundación Universitaria Los Libertadores como guantes, gafas de seguridad, tapabocas y careta, según sea la necesidad de montaje u operación.

4.1.2.3 Elementos para el mantenimiento del banco: Incluye aceite, filtros, tornillería, empaques y demás elementos necesarios para el mantenimiento en funcionamiento del banco de pruebas y el motor.

4.1.2.4 Combustibles: El principal insumo a utilizar en el desarrollo del proyecto son los combustibles, gasolina y etanol para la mezcla de combustible a ensayar en el banco, donde se necesitarán 25 galones de gasolina y 18 galones de etanol.

4.2 METODOLOGÍA

El presente trabajo de investigación pertenece al campo de la investigación aplicada, empleando conceptos probados previamente por otros autores, aplicándolos a situaciones prácticas. El trabajo de grado parte del proyecto de investigación en el mismo campo del grupo de investigación GIDAD mecánica, Proyecto de investigación que suministrará el banco de pruebas y la instrumentación necesaria.

Con el banco de pruebas diseñado, construido, instrumentado y con señales adquiridas comienza el trabajo de investigación contemplado en el presente documento.

4.2.1 PUESTA A PUNTO DE BANCO DE PRUEBAS PARA MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

Se comenzará con la calibración de los equipos e instrumentos, utilizando los patrones y procedimientos estipulados para tal fin por los fabricantes de dichos equipos e instrumentos. Con la calibración completa se verificará la adquisición de señales con la tarjeta de adquisición de datos y se pondrá en marcha el motor operando con gasolina según lo estipulado en la NTC 1930. Se verificarán los parámetros de operación del sistema de freno de banco de resistencias y parámetros de operación del motor, lo que incluye voltaje, corriente, velocidad de giro, consumo de aire y combustible, emisiones de escape para diferentes condiciones de carga. Con lo anterior se podrán dar los ajustes finales de calibración de todos los sistemas que componen el banco de pruebas.

4.2.2 TOMA DE DATOS EXPERIMENTALES

Se realizarán tomas de datos para diferentes condiciones de carga, regímenes de giro y mezclas gasolina-etanol de la siguiente manera:

4.2.2.1 Condiciones de carga. Se evaluarán las condiciones aumentando la carga en 4 intervalos iguales hasta la carga máxima. Esto es 25%, 50%, 75% y 100% de la carga máxima para el motor.

4.2.2.2 Regímenes de giro. Se evaluarán para cada una de las condiciones de carga tres velocidades angulares diferentes, de acuerdo a las velocidades de operación del generador eléctrico instalado en el banco de pruebas. Estas son 2700, 3600 y 4320 RPM.

4.2.2.3 Mezclas gasolina-etanol. Se evaluarán las mezclas E10, E15, E20, E40, E60, E85 y E100 para cada una de las condiciones de carga y regímenes de giro descritos anteriormente.

4.2.2.4 Emisiones específicas. Se tomarán datos de las emisiones reguladas CO, CO₂, HC y NO_x del MCI-EP operando en cada condición de las descritas anteriormente.

4.2.2.5 Matriz experimental. Se diseña la matriz experimental con las condiciones planteadas, de la siguiente manera:

Mezclas de combustibles	E10			E15			E20			E40			E60			E85			E100		
velocidades (RPM)	2700	3600	4320	2700	3600	4320	2700	3600	4320	2700	3600	4320	2700	3600	4320	2700	3600	4320	2700	3600	4320
carga	25%	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	50%	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	75%	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	100%	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Donde ✓ indica la medición de CO, CO₂, HC y NO_x en la condición.

4.2.3 ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

Los datos obtenidos se analizarán por un modelo estadístico adecuado al número de datos recogidos, la calidad de los mismos y la dispersión encontrada, modelo

que será definido en esta fase después de realizar medidas estadísticas básicas como promedio, media, varianza y desviación estándar en cada una de las condiciones establecidas, para determinar confiabilidad y repetitividad de las mediciones experimentales.

Con los datos clasificados y validados se calcularán las emisiones específicas al freno y posteriormente se construirán tablas y gráficas que permitan visualizar la tendencia de cada una de las emisiones de acuerdo a la mezcla gasolina-etanol utilizada.

4.3 PRESUPUESTO

El presupuesto presentado en este apartado corresponde a los numerales 4 (Presupuesto) y 5 (Tablas de presupuesto) del presupuesto presentado en el proyecto de investigación *Evaluación de las emisiones reguladas de un motor de combustión interna (MCI) encendido por chispa en la ciudad de Bogotá, operando con mezclas de gasolina-etanol anhidro*, aprobado con el acta ING-002-15 e iniciado el 02 de octubre de 2015.

4.3.1 FUENTES DE FINANCIACIÓN

El proyecto será financiado en su totalidad por la Fundación Universitaria Los Libertadores.

4.3.2 TABLAS DE PRESUPUESTO

4.3.2.1 Tabla de presupuesto global de la propuesta por fuentes de financiación

RUBROS	FUENTES	TOTAL
	Libertadores	
EQUIPOS	\$ 33,900,000.00	\$33,900,000.00
MATERIALES	\$ 1,500,000.00	\$ 1,500,000.00
SERVICIOS TÉCNICOS	\$ 13,000,000.00	\$13,000,000.00
TOTAL	\$ 48,400,000.00	\$48,400,000.00

4.3.2.2 Tabla de descripción de los equipos que se planea adquirir.

EQUIPOS	JUSTIFICACIÓN	RECURSOS	TOTAL
		Libertadores	
Analizador de gases Gasbox con sus respectivos filtros y soportes para uso portátil.	Es necesario para medir CO ₂ , CO, HC, NOx. La institución no cuenta con un equipo de análisis de gases.	\$ 16,240,000.0	\$ 16,240,000.0
Generador eléctrico operando a 1800 RPM, a 10 kW	Este equipo es necesario para generar la carga del motor. La institución no cuenta con este equipo.	\$ 2,100,000.0	\$ 2,100,000.0
Banco de resistencias, con capacidad de 15 kW, operando con ajuste fino de 100 W.	Este equipo es necesario para frenar el motor. La institución, no cuenta con este equipo.	\$ 5,000,000.0	\$ 5,000,000.0
Encoder, abz/oc, eje 3/8", flanche, ip65, 7pin END	Este equipo es necesario para medir las rpm del motor y el ángulo de giro, respecto a la apertura de válvulas del motor. La institución no cuenta con este equipo.	\$ 2,860,000.0	\$ 2,860,000.0
Termo-higrómetro portátil, 10 a 95% humedad relativa, con un rango de 10 a 60 C	Este equipo se requiere con el fin de medir la humedad relativa del sitio donde se realizarán las pruebas. La institución no cuenta con este equipo.	\$ 1,000,000.0	\$ 1,000,000.0
Tubo Pitot con manómetro diferencial digital.	Este equipo se requiere para medir el consumo específico de aire a la entrada del motor. La institución no cuenta con este equipo	\$ 1,800,000.0	\$ 1,800,000.0
Tarjeta de adquisición de datos Marca National Instruments.	Este equipo se utilizará para recoger parámetros como temperatura, presión de cámara de combustión, rpm. La institución no cuenta con este equipo.	\$ 4,900,000.0	\$ 4,900,000.0
TOTAL		\$ 33,900,000	\$ 33,900,000

4.3.2.3 Tabla de materiales y suministros.

MATERIALES	JUSTIFICACIÓN	VALOR
Papelería y fotocopias	Impresiones de avances de proyecto y artículos. Copias de documentos útiles para la investigación.	\$100,000.00
Etanol	Para mezclas (18 galones)	\$300,000.00
Gasolina	Para mezclas (25 galones)	\$400,000.00
Elementos de protección personal	Elementos para proteger la integridad de los investigadores en el momento de realizar mediciones.	\$200,000.00
Aceites, filtros, tornillería, empaques etc.	Para el mantenimiento del banco de pruebas.	\$500,000.00
Total		\$ 1,500,000.00

4.3.2.4 Tabla de servicios técnicos

TIPO DE SERVICIO	JUSTIFICACIÓN	VALOR
Calibración de instrumentos de medición.	Los resultados de la investigación serán válidos si los instrumentos toman mediciones confiables	\$ 4,000,000.00
Banco de pruebas	Fabricación de estructura y componentes del banco.	\$ 9,000,000.00
TOTAL		\$13,000,000.00

4.4 CRONOGRAMA

DESCRIPCION DE ACTIVIDADES	Semanas																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
PUESTA A PUNTO DE BANCO DE PRUEBAS	x	x	x	x																
Calibración de instrumentos	x	x																		
Adquisición de señales		x	x																	
Verificación de banco de resistencias			x	x																
TOMA DE DATOS EXPERIMENTALES					x	x	x	x	x	x	x	x	x							
Toma de datos E100					x	x	x													
Toma de datos E85							x	x												
Toma de datos E60								x	x											
Toma de datos E40									x	x										
Toma de datos E20										x	x									
Toma de datos E15											x	x								
Toma de datos E10					x							x	x							
ANÁLISIS DE RESULTADOS														x	x	x	x			
Aplicación de modelo estadístico														x	x					
Construcción de tablas de resultados															x	x				
Construcción de gráficas de resultados															x	x	x			
CONCLUSIONES																	x	x		
Formulación de conclusiones																	x	x		
Recomendaciones																		x		
DOCUMENTO FINAL					x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

5. MONTAJE EXPERIMENTAL

Con la recepción del banco de pruebas, fabricado según especificaciones y diseño, comienza el procedimiento experimental seleccionando y adecuando el lugar para los equipos; para este fin la institución asignó el taller de la sede AUTOMECASTRÓNICA.

Con los equipos e instrumentos y el espacio físico asignado, se comienza a distribuir y fabricar todos los accesorios necesarios para ubicar los equipos e instrumentos, de tal manera que puedan cumplir su función en forma adecuada y con la menor cantidad de alteraciones e interferencias posible.

De este proceso se llega a la distribución que se presenta en la figura 1, donde se observan todos los equipos e instrumentos ubicados y conectados para su funcionamiento, que a continuación se enumeran y describen:

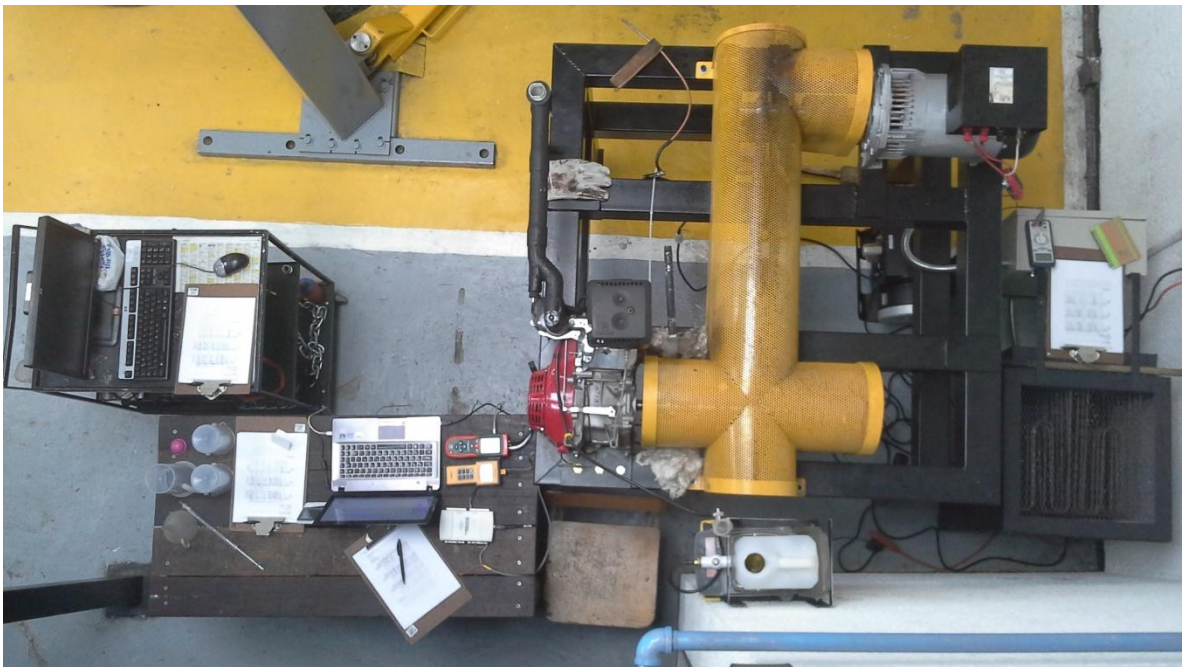


Figura 1 - Vista en planta del montaje experimental, imagen tomada durante la pausa de almuerzo en la toma experimental en octubre de 2016. Fuente: Elaboración propia.



Figura 2 - Esquema montaje sistema de aire. Fuente: Elaboración propia.

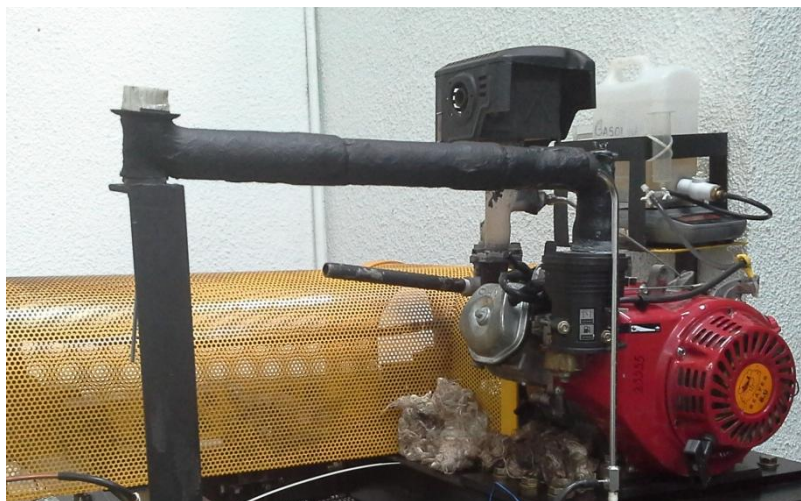


Figura 3 - Montaje sistema de aire. Fuente: Elaboración propia.

En la figura 2 se señala con un óvalo rojo el sistema de admisión modificado (tubo negro en ABS reforzado en fibra de vidrio), de tal manera que el tubo pitot se ubique fijo en éste, midiendo la velocidad de entrada de aire. El instrumento señalado es el anemómetro digital que se encuentra conectado al tubo pitot. Los datos de éste se almacenan en el computador. En la figura 3 se muestra el sistema montado en el motor con el tubo pitot instalado.



Figura 4 - Esquema montaje sistema de combustible. Fuente: Elaboración propia.

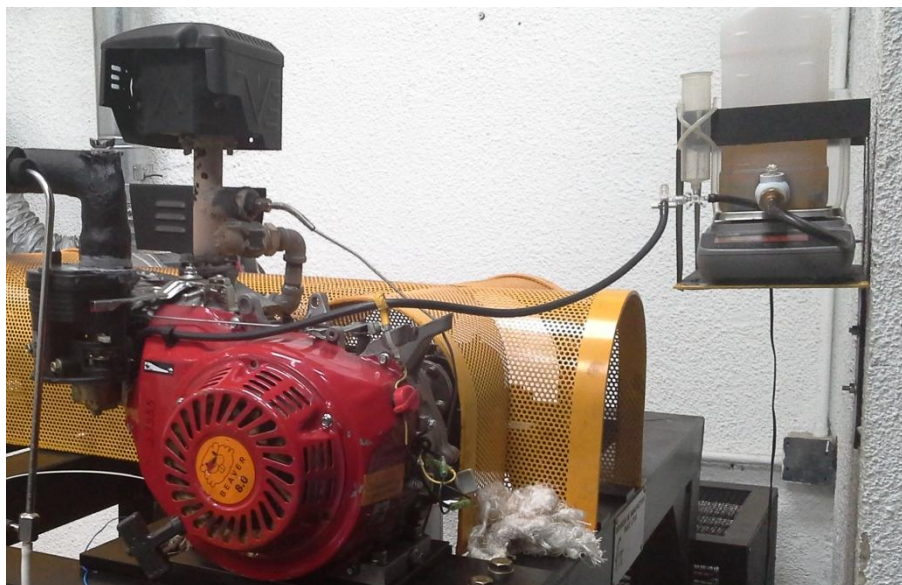


Figura 5 - Montaje sistema de combustible. Fuente: Elaboración propia.

En la figura 4 se señala el tanque de combustible que alimenta el motor, ubicado en una balanza digital instalada en un soporte aislado de la vibración producida por el motor, para evitar interferencias en la lectura de consumo de combustible en masa. En la figura 5 se muestra el sistema de combustible donde se aprecia que la balanza con el tanque está en un soporte independiente y separado, para evitar los errores de lectura de la balanza causados por la vibración.



Figura 6 - Esquema montaje analizador de gases. Fuente: Elaboración propia.

En la figura 6, de derecha a izquierda, apreciamos el analizador de gases ubicado en el suelo y protegido por la estructura del banco, la sonda hecha a medida y el sistema de escape modificado para tomar una muestra de los productos de escape; a la izquierda está el computador conectado al analizador vía bluetooth, utilizado para recopilar estos datos.



Figura 7 - Esquema montaje de generador eléctrico. Fuente: Elaboración propia.

En la figura 7 se señalan el generador eléctrico acoplado al motor y el multímetro digital utilizado para medir voltaje, y la pinza voltiamperimétrica utilizada para medir la corriente entregada por el generador.



Figura 8 - Esquema zona de mezclas. Fuente: Elaboración propia.

En la figura 8 se muestra la ubicación de la probeta y los recipientes utilizados para medir el volumen de combustible y realizar la preparación de las mezclas para alimentar el motor durante la prueba.



Figura 9 - Esquema motor y transmisión. Fuente: Elaboración propia.

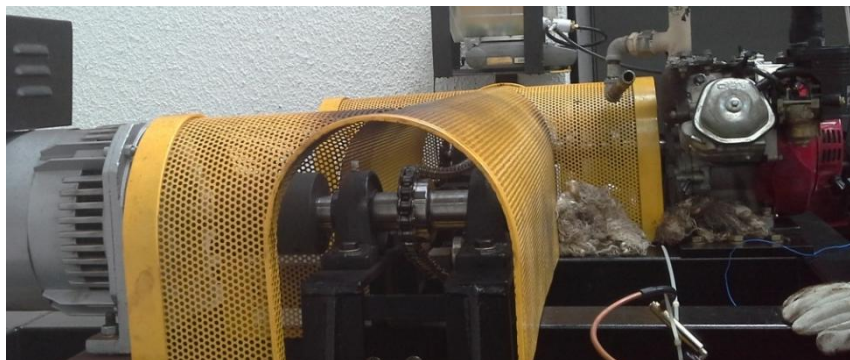


Figura 10 - Motor y transmisión. Fuente: Elaboración propia.

En la figura 9 observamos el motor de combustión interna utilizado. Dentro de la malla de protección amarilla se encuentran ubicados los acoples y la transmisión por cadena, que llevan la potencia generada en el motor hasta el generador eléctrico que actúa como freno. En la figura 10 podemos apreciar la cadena de transmisión dentro de la malla, el motor en el extremo derecho y el generador a la izquierda.



Figura 11 - Esquema banco de resistencias. Fuente: Elaboración propia.



Figura 12 - Banco de resistencias. Fuente: Elaboración propia.

En la figura 11 se señalan las resistencias destinadas a consumir la potencia entregada por el generador y la caja de interruptores que activan el paso de corriente por las diferentes resistencias para lograr las diferentes potencias. En la figura 12 se muestra la caja de interruptores.



Figura 13 - Esquema montaje encoder. Fuente: Elaboración propia.



Figura 14 - Montaje encoder. Fuente: Elaboración propia.

En la figura 13 se observa un círculo rojo en la malla de protección; en este punto se encuentra instalado el encoder encargado de registrar la posición angular del eje; se señala también la tarjeta de adquisición de datos a la cual está conectado el encoder, por medio de la cual se pasa la información al computador donde se calcula la velocidad angular del motor en RPM por medio de software. En la figura 14 se observa el montaje del encoder dentro de la malla de protección, acoplado al eje por medio de una cadena de transmisión con piñones que dan una relación 2,5 a 1, la cual es tomada en cuenta en la programación del software para calcular la velocidad angular del motor.



Figura 15 - Esquema montaje de temperatura. Fuente: Elaboración propia.

En la figura 15, junto al computador, se aprecia el termo-higrómetro con el cual se registran temperatura ambiente y humedad relativa, una termocupla instalada fija en el sistema de escape y una termocupla independiente, con la cual se toman medidas de temperatura de gases de escape en la salida señalada.

5.1 EQUIPOS E INSTRUMENTOS

INSTRUMENTO	MEDICIÓN	UNIDADES (símbolo)	RESOLUCIÓN
Pinza voltiamperimétrica	Corriente entregada por el generador al banco de resistencias	Amperios (A)	0.1 A
Multímetro digital	Voltaje de salida del generador	Voltios (V)	1 V
Termo-Higrómetro	Temperatura ambiente	Grado Celsius (°C)	0.1 °C
Termo-Higrómetro	Humedad relativa	Porcentaje (%)	1 %
Balanza digital	Masa inicial y final de combustible	Gramos (g)	0.1 g
Cronómetro	Tiempo de consumo de combustible	Minuto:Segundo (min:s)	0.01 s
Encoder y tarjeta de adquisición de datos	Velocidad angular del motor	Revoluciones por minuto (RPM)	0.1 RPM
Termocupla tipo K	Temperatura de los gases de escape junto al motor	Grado Celsius (°C)	0.1 °C

Termocupla tipo K		Temperatura de los gases de escape a la salida	Grado Celsius (°C)	0.1 °C
Tubo pitot y anemómetro digital		Velocidad de entrada de aire en la admisión	Metro por segundo (m/s)	0.01 m/s
Analizador gases	de	Porcentaje de CO en el escape	Porcentaje en volumen (%)	0.01 %
Analizador gases	de	Porcentaje de CO ₂ en el escape	Porcentaje en volumen (%)	0.1 %
Analizador gases	de	Partes por millón de HC en el escape	Partes por millón en volumen (ppm)	1 ppm
Analizador gases	de	Porcentaje de O ₂ en el escape	Porcentaje en volumen (%)	0.01%
Analizador gases	de	Partes por millón de NO en el escape	Partes por millón en volumen (ppm)	1 ppm
Probeta		Volumen de combustible para mezcla	Mililitro (mL)	1 mL

5.2 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Para comenzar con la toma de datos se sigue el siguiente procedimiento:

- Se conectan y verifican todos los instrumentos y equipos a utilizar.
- Se prepara la mezcla de combustible a utilizar, a partir de E10 comercial y etanol anhidro puro, utilizando para ello la probeta para medir y el tanque para almacenar el combustible.
- Se enciende el motor utilizando E10, sin carga, con el choque puesto y la mariposa en apertura parcial.
- Se estabiliza el motor manipulando la mariposa, buscando unas revoluciones ligeramente menores a las de la prueba a realizar.
- Se espera aproximadamente 5 minutos a que el motor caliente y se utiliza la información de la termocupla ubicada fija en el escape, para verificar que la temperatura estabilice.
- Se acciona la válvula de selección de combustible para seleccionar la mezcla preparada para la prueba a realizar.

- Se esperan 2 minutos a que el combustible dentro del sistema de alimentación y dentro del motor sea consumido y reemplazado por la nueva mezcla.
- Se manipula la mariposa para buscar las revoluciones deseadas para la prueba.
- Se enciende el generador y se activa el primer interruptor para poner una carga de 100 W.
- Se abre la mariposa hasta obtener las revoluciones deseadas.
- Se aumenta la carga en 100 W y se repite el ajuste de la mariposa hasta que el sistema con la mariposa completamente abierta no alcance las revoluciones deseadas, entonces se devuelve a la carga anterior y se estabiliza en las revoluciones deseadas, dando 2 minutos para comprobar que el motor puede mantener la velocidad con esa carga.
- Se procede a tomar datos en cada una de las estaciones y se consignan esos datos en las planillas diseñadas para tal fin.
- Se calcula el 75%, 50% y 25% de la carga máxima para el motor a esa velocidad y con esa mezcla, si no se puede lograr el porcentaje exacto, se buscan los valores más cercanos posibles.
- Se baja la carga y se regula la mariposa para estabilizar en las revoluciones deseadas.
- Se procede nuevamente a la toma de datos en todas las estaciones.
- Se continúa bajando la carga hasta tomar todos los puntos deseados.
- Cuando se ha completado el barrido, se quita la carga y se bajan las revoluciones; luego se esperan 3 minutos y se repite el procedimiento para la siguiente toma de datos.
- Cuando se completan las tomas de datos, se apaga el motor y se procede a cambiar el combustible del tanque por la siguiente mezcla para realizar la siguiente medición.
- Una vez completadas todas las mediciones a una velocidad, se procede a cambiar el piñón de transmisión de la cadena por el siguiente y ajustar la cadena y el tensor para el nuevo cambio, repitiendo un procedimiento idéntico para la toma de datos.
- Entre toma y toma se realizan algunas operaciones de mantenimiento, como limpieza de la sonda de gases con aire comprimido y, cuando es necesario, se lubrica la cadena de transmisión.

Con los datos recolectados se digitalizan las planillas y se consignan los datos en hoja de cálculo para calcular las mediciones indirectas, con las cuales se procede a analizar la información, validarla y construir las gráficas pertinentes.

5.3 VARIACIONES AL DISEÑO EXPERIMENTAL

En el planteamiento del proyecto se consideraron 8 mezclas, operando a 4 condiciones de carga y 4 velocidades diferentes, no obstante la matriz experimental fue ajustada durante su desarrollo por diversos factores:

- De las mezclas planteadas: E0, E10, E15, E20, E40, E60, E85 y E100 fue necesario descartar E0, pues no fue posible conseguir gasolina pura ya que la gasolina comercial en Colombia es E10 y la gasolina conseguida como pura -al hacer sencillas pruebas como densidad- no cumplía con las características que debería tener E0, evidenciando ser E10 o tener algún aditivo desconocido que impedía su uso en el proyecto.
- De las velocidades del motor inicialmente planteadas de 1800, 2700, 3600 y 4320 RPM se descartó la más baja, 1800 RPM, dado que el motor presentaba un comportamiento inestable y una tendencia fuerte a apagarse al bajar de 2200 RPM incluso sin carga, haciendo que la toma de datos en esta condición de velocidad fuera incongruente, con datos erróneos y poco confiables. Para los cálculos requeridos en este experimento es necesario un estado estable de las condiciones de operación del motor.
- Las condiciones de carga inicialmente planteadas: 25, 50, 75 y 100% de carga fueron ajustadas de acuerdo a dos parámetros: primero, cuando las resistencias disponibles para el banco no permitían llegar a estos valores se seleccionó el porcentaje de carga más próximo a estos entre los disponibles, ya que el banco de resistencias tiene una resolución de 100 W y algunas condiciones presentaron por ejemplo carga máxima de 300 W; se tomaron entonces 67% y 33% de carga por no tener disponible una mejor resolución. El segundo factor fue la decisión de replicar las condiciones de carga de E100 en las otras mezclas, ya que E100 presenta la menor potencia máxima en cada condición de velocidad y se determinó que al hacer un comparativo era muy beneficioso tener información en los mismos puntos; luego en las demás mezclas se buscaron las cargas máximas, 75, 50, 25, máxima para E100, y los demás puntos tomados para E100 teniendo hasta 8 tomas para una misma mezcla.

6. ANÁLISIS Y RESULTADOS

El análisis de los resultados comienza con la digitación en hoja de cálculo de los datos recopilados en planillas, validando en el proceso los valores comparados con los demás valores para la misma medida en condiciones similares, para rastrear posibles errores de escritura. El dato de velocidad de aire en la admisión se toma de la planilla y se contrasta con el histórico de datos almacenados por el anemómetro digital en cada toma, para seleccionar un valor que sea representativo de la condición de operación en cada una de las pruebas. Los formatos de recolección de datos se presentan en el Anexo A.

Con los datos en una hoja de cálculo, se procede a formular las operaciones necesarias para realizar las mediciones indirectas de los datos necesarios para el análisis planteado en los objetivos, a partir de las mediciones directas realizadas. Se calcula potencia a partir de voltaje y corriente producida por el generador, teniendo en cuenta la eficiencia del generador y la cadena de transmisión y se calcula torque a partir de la potencia y la velocidad del motor. El flujo másico de combustible se calcula a partir de la diferencia de masa en la prueba y el tiempo de esta y por último, se calcula el flujo másico de aire a partir de las dimensiones del conducto de admisión y la velocidad del aire, utilizando para ello las correcciones a la densidad del aire que presentan la temperatura y humedad relativa tomadas en las pruebas [41] [42] [43] [44].

Los parámetros constantes necesarios en los cálculos se miden una vez o se consultan en la literatura, se tomaron mediciones de dimensiones del conducto de admisión y presión atmosférica, se leen de los manuales las constantes adecuadas como la eficiencia del generador eléctrico y el volumen de desplazamiento del motor y se consulta el poder calorífico inferior de los combustibles a utilizar [45] [46] [47]. Los parámetros constantes utilizados se presentan en el Anexo B.

Partiendo de los datos medidos directa e indirectamente se procede a calcular las emisiones específicas reguladas, nuestro objeto de estudio, utilizando para ello las definiciones consignadas en las secciones 3.2.1 y 3.2.2 del presente documento. El resumen de los resultados de estos cálculos se presentan en el Anexo C.

Teniendo los resultados de emisiones específicas, consumo específico de combustible y eficiencia térmica, se procede a elaborar gráficos de su

comportamiento en cada condición de velocidad evaluada en función del trabajo producido, utilizando para ello BMEP como medida de carga del motor, mostrando la tendencia para cada una de las mezclas estudiadas: E10, E15, E20, E40, E60, E85 y E100 en las velocidades del motor: 2700, 3600 y 4320 RPM.

Las tendencias se seleccionan para cada caso individual, buscando la curva que mejor se aproxime a los datos de manera visual y la que presente el mayor coeficiente de correlación al cuadrado (R^2), como una medida de qué tanto la regresión describe la relación existente entre las dos variables. Se debe notar que para el tamaño de la muestra un R^2 grande no necesariamente es conveniente, dado que puede indicar que la regresión está incorporando el ruido y la incertidumbre de las medidas; para evitar este efecto indeseado se efectúa el análisis de ajuste visual, teniendo en cuenta la dispersión de los datos arriba y debajo de la curva de manera más aleatoria que sistemática.

En las secciones 6.1, 6.2 y 6.3 se presentan los porcentajes de variación respecto a E10; estos porcentajes se calculan promediando la variación de los resultados para cada condición de carga, utilizando para ello únicamente las cargas para las cuales todas las mezclas presentan resultados. La mezcla con menor potencia máxima fue E100 en las 3 velocidades evaluadas, luego el porcentaje de variación se calculó hasta la potencia máxima de esta mezcla en cada velocidad del motor. Estos resultados se presentan de manera únicamente comparativa y no deben ser utilizados en cálculos de ningún tipo, pues no corresponden a un modelo estadístico ni cuentan con mecanismo alguno de validación.

Se evalúa el desempeño del motor por medio del consumo de combustible como primer parámetro, para comparar las diferentes mezclas planteadas; se evalúa el consumo específico para que este dato esté en términos de energía y permita hacer posteriores comparaciones, tanto con los resultados obtenidos en otras condiciones de carga o velocidad, como con datos obtenidos por otros investigadores. El consumo de combustible se presenta como consumo específico de combustible al freno BSFC, cuyas unidades más utilizadas en la literatura son gramo de combustible consumido por kilovatio-hora generado.

Posteriormente se evalúa la eficiencia térmica como segundo parámetro de desempeño del motor, por ser éste un indicador de la combustión y de cuánta energía está entregando la mezcla evaluada. La eficiencia térmica es calculada con la ecuación 19 utilizando la potencia, el poder calorífico de la mezcla, el flujo másico de combustible y la eficiencia de combustión.

Por último, se evalúan las emisiones contaminantes como indicadores de la combustión para cada mezcla evaluada, en términos de masa de emisión por unidad de energía producida por el motor, para tener resultados comparables con otras condiciones de carga y otros motores. Las emisiones evaluadas en el presente trabajo son emisión específica de dióxido de carbono al freno $BSCO_2$, emisión específica de monóxido de carbono al freno $BSCO$, emisión específica de óxidos de nitrógeno al freno $BSNO_x$ y emisión específica de hidrocarburos al freno $BSHC$, todas con unidades de gramo de emisión por kilovatio-hora generado.

Estos parámetros se comparan en términos de la presión media efectiva al freno BMEP, una medida de la potencia entregada por el motor que es independiente al tamaño del mismo, lo cual la hace una medida ideal para comparar los resultados con otros motores y otras condiciones experimentales. El BMEP tiene unidades de presión y se presenta en kilo Pascales.

Con estos resultados se construyen las gráficas que se presentan en las secciones 6.1, 6.2 y 6.3, donde se muestra cada uno de los parámetros evaluados en función de BMEP para cada condición de velocidad.

Por último se calculan porcentajes de variación respecto a E10, utilizando los valores punto a punto para las condiciones de carga medidas a la mezcla que presentó la menor potencia, E100, las cuales se replicaron en todas las mezclas. Las variaciones punto a punto se promediaron y los resultados se presentan en las tablas al final de las secciones 6.1, 6.2 y 6.3. El porcentaje de variación general se presenta en la sección 6.4, calculado promediando los resultados para cada una de las velocidades del motor.

6.1 CONSUMO ESPECÍFICO DE COMBUSTIBLE AL FRENO

El consumo de combustible presenta datos consistentes y una muy buena repetitividad, evidenciada en la baja dispersión de los mismos.

En el gráfico 3 se muestra el comportamiento del BSFC para las mezclas a 2700 RPM, donde se observa un comportamiento decreciente del consumo específico de combustible a medida que aumenta la BMEP, teniendo el menor consumo específico registrado para la condición de máxima potencia para cada mezcla. Este es el comportamiento esperado, puesto que la condición óptima de operación del motor es con mariposa completamente abierta y carga máxima.

También se puede observar que las curvas están ordenadas con E100, mezcla que presenta el mayor consumo, seguida en orden por E85, E60, E40, E20, E15 y E10. Este es el comportamiento esperado debido al poder calorífico de las mezclas, en las cuales las de mayor poder calorífico necesitan menos masa para entregar la misma energía.

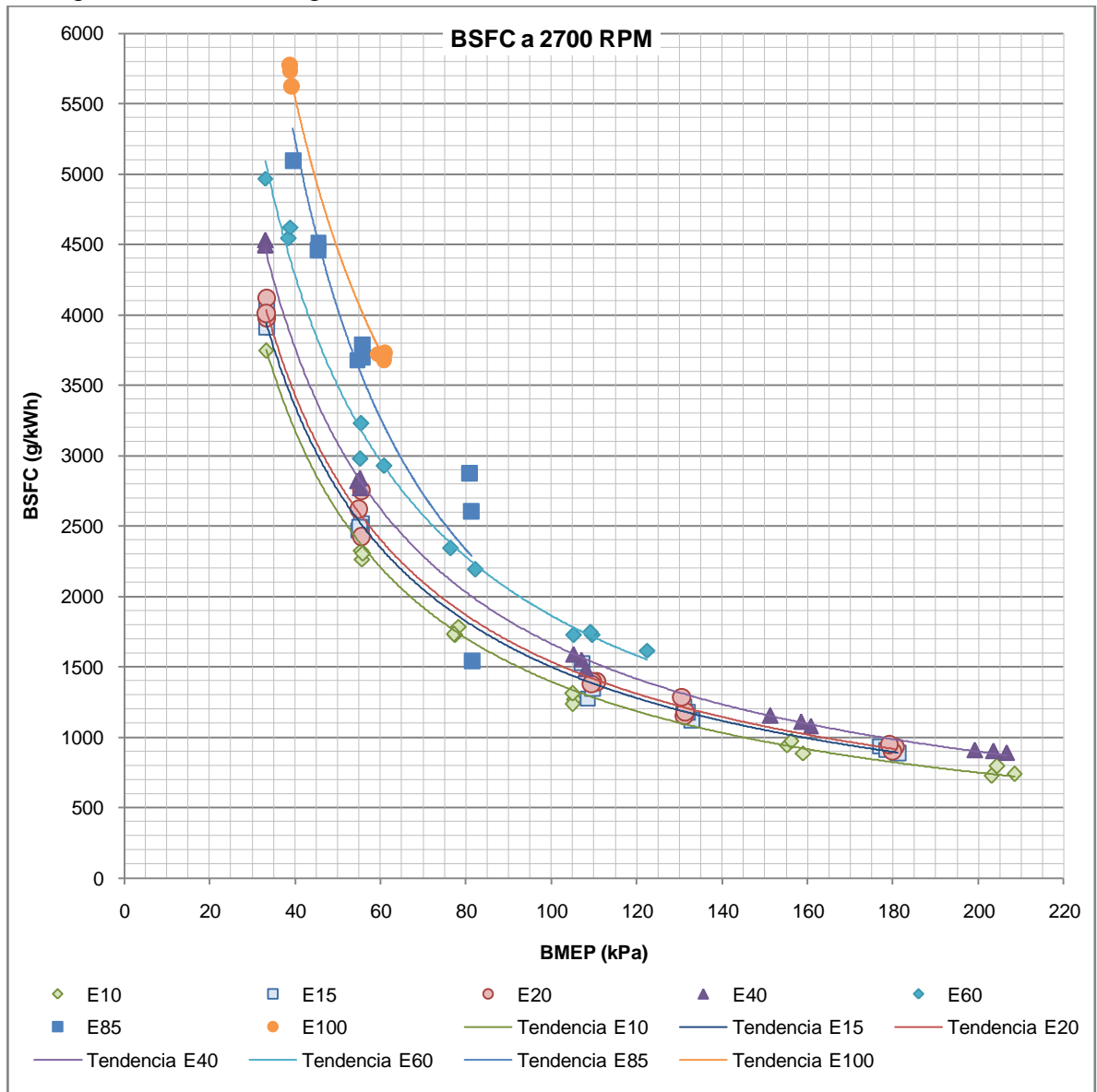


Gráfico 3 - Consumo específico de combustible al freno en función de la presión media efectiva al freno para 2700 RPM. Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico 4 apreciamos un comportamiento similar del BSFC para 3600 RPM, en relación con el presentado a 2700 RPM (gráfico 3), con la diferencia de que las curvas están más próximas, lo que se explica por el hecho de que el motor presenta su máxima potencia a 3600 RPM, que es la velocidad óptima de

operación, donde todo el sistema funciona de la mejor manera posible. Esta es una condición sumamente estable, lo que ayuda a que las mediciones tengan una dispersión muy baja y una muy buena repetitividad.

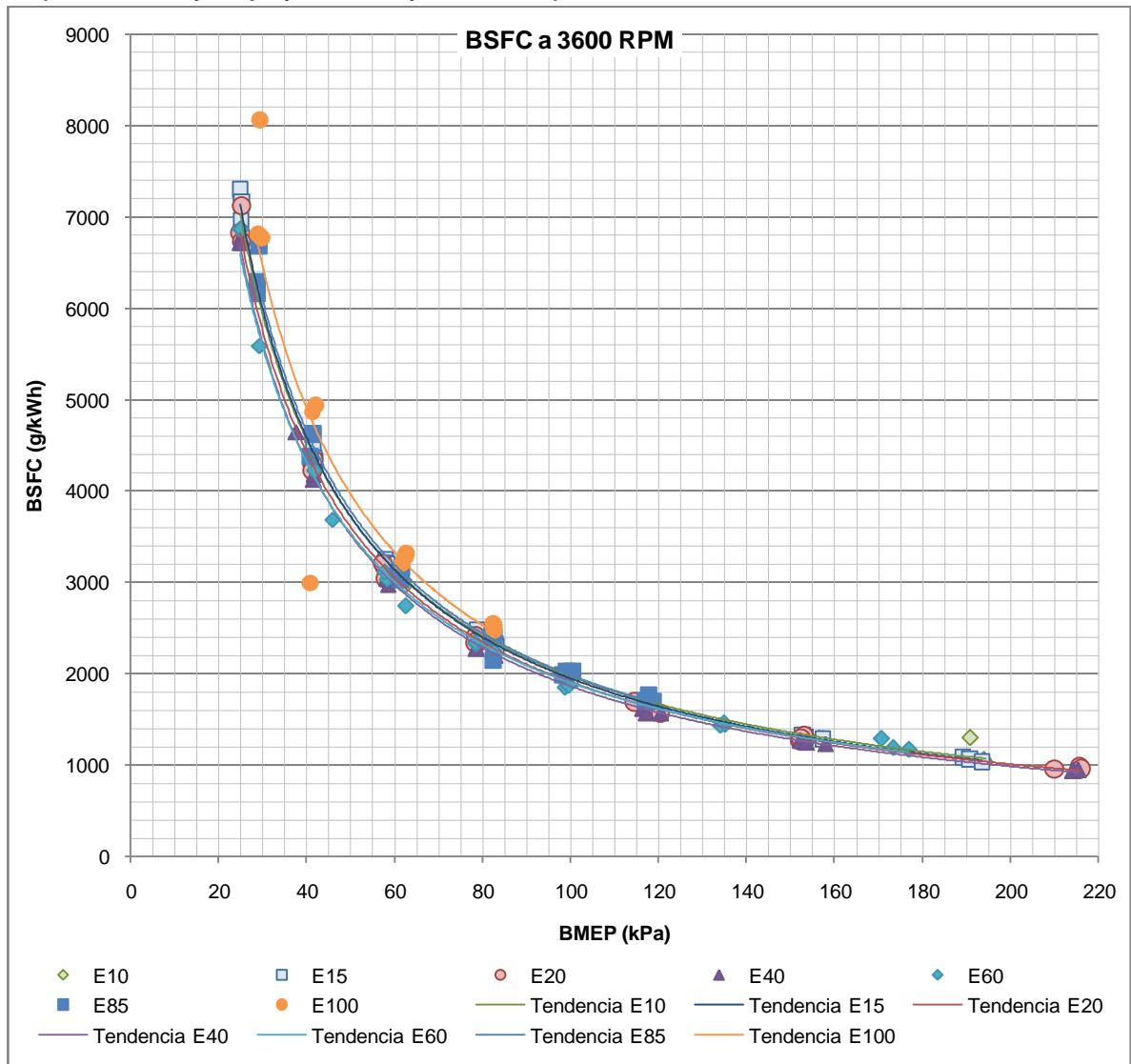


Gráfico 4 - Consumo específico de combustible al freno en función de la presión media efectiva al freno para 3600 RPM. Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico 5 encontramos el BSFC para 4320 RPM, donde vemos que continúa la misma tendencia de curva decreciente conforme aumenta el BMEP, para esta condición el consumo para la mezcla E100 aumenta respecto a las demás mezclas de manera significativa y E85 aumenta también en menor medida que E100. Las demás mezclas permanecen con valores de consumo específico muy cercanos.

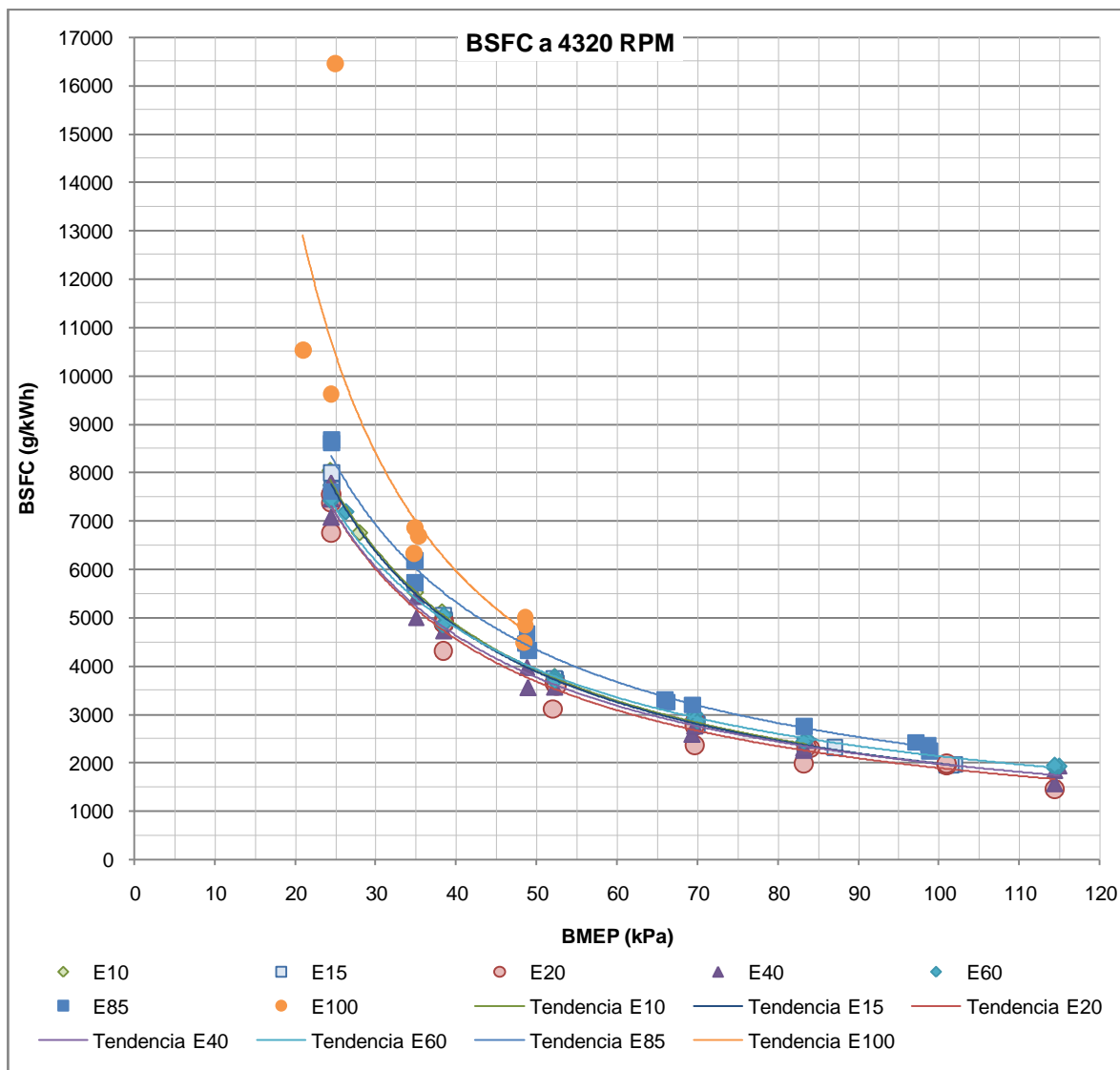


Gráfico 5 - Consumo específico de combustible al freno en función de la presión media efectiva al freno para 4320 RPM. Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 1 observamos que para 2700 RPM, al aumentar el contenido de etanol en cada mezcla va aumentando su consumo progresivamente comparado con el consumo para la misma condición de la mezcla E10. Para 3600 RPM las variaciones son muy pequeñas, presentando el mayor consumo relativo en E15 y el menor en E60. Para 4320 RPM las mezclas E100 y E85 aumentan significativamente el consumo, mientras que las demás mezclas evaluadas lo reducen ligeramente respecto a E10.

Tabla 1 - Comparativo de consumo específico de combustible al freno respecto a E10 para cada velocidad del motor. Fuente: Elaboración propia.

Porcentaje de variación respecto a E10		
RPM	Mezcla	Variación
2700	E10	0,00%
	E15	5,84%
	E20	8,64%
	E40	19,32%
	E60	27,08%
	E85	41,53%
	E100	54,51%
3600	E10	0,00%
	E15	2,20%
	E20	0,02%
	E40	-2,50%
	E60	-4,81%
	E85	-1,14%
	E100	3,80%
4320	E10	0,00%
	E15	-0,59%
	E20	-6,21%
	E40	-1,86%
	E60	-2,74%
	E85	15,35%
	E100	39,08%

6.2 EFICIENCIA TÉRMICA

La eficiencia térmica es un indicador de cuánta de la energía liberada por el combustible al quemarse se está trasformando en trabajo útil, es decir, potencia al freno al evaluarlo por unidad de tiempo.

Para el cálculo de la eficiencia térmica se utiliza la eficiencia de combustión, parámetro que no se puede medir directamente y cuya medición indirecta es extremadamente difícil, ya que requiere observar directamente la cámara de combustión del motor. Debido a esto la eficiencia de combustión es estimada a partir de los productos de escape, considerando una combustión completa la

estequiométrica donde todo el carbono se trasforma en CO_2 . La eficiencia se define entonces como el CO_2 real sobre el CO_2 estequiométrico.

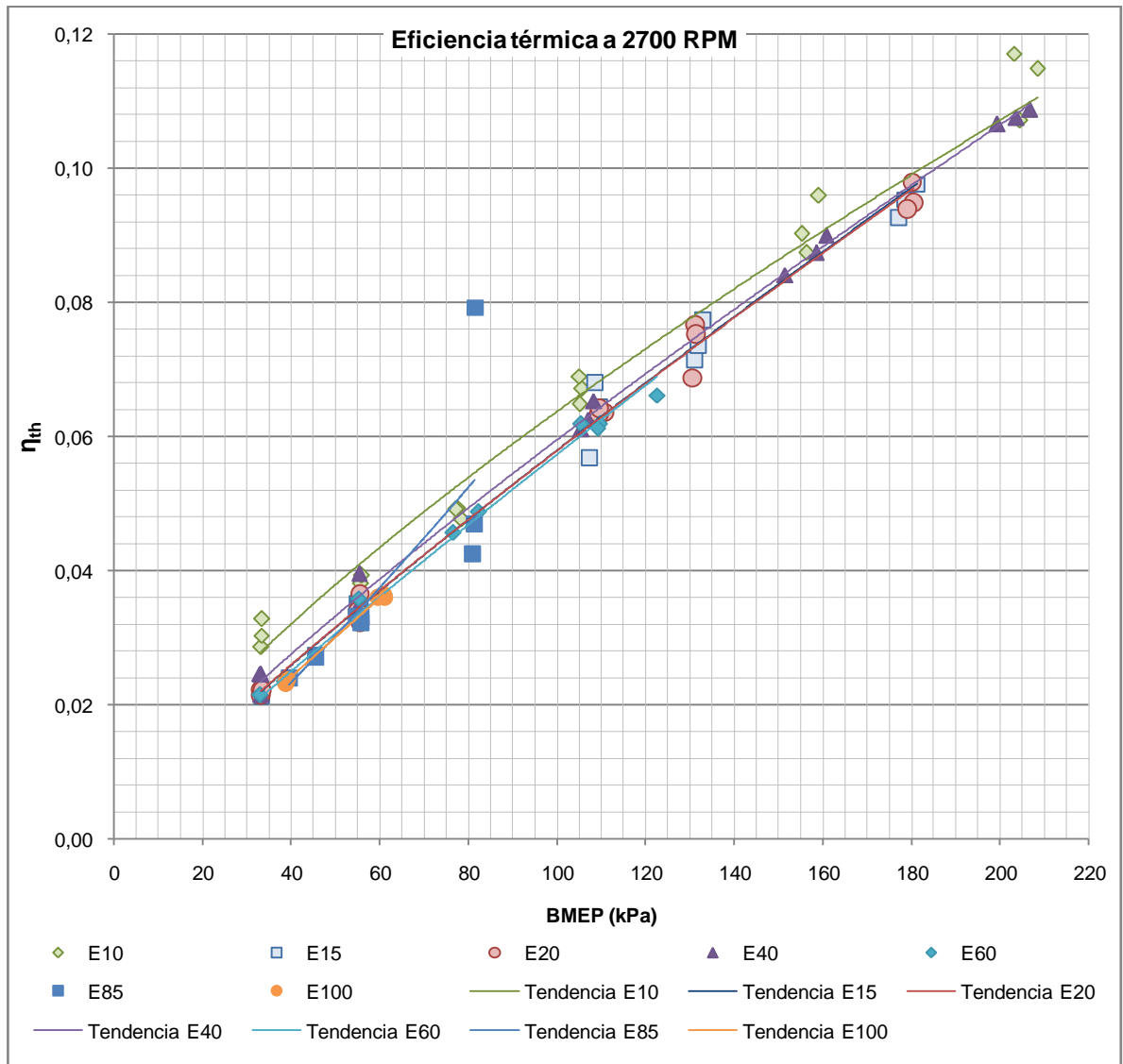


Gráfico 6 - Eficiencia térmica en función de la presión media efectiva al freno para 2700 RPM. Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico 6 se observa que todas las mezclas presentan un aumento de la eficiencia térmica con el aumento de BMEP, siendo para 2700 RPM E10 la mezcla que presenta la mayor eficiencia y E100 la menor. En esta condición, las curvas que describen el comportamiento de cada mezcla están muy cercanas entre sí, con la salvedad de E10 que presenta una marcada mayor eficiencia a baja potencia y se acerca a las demás curvas a medida que aumenta BMEP hasta cruzarse con la curva de E40 a máxima potencia.

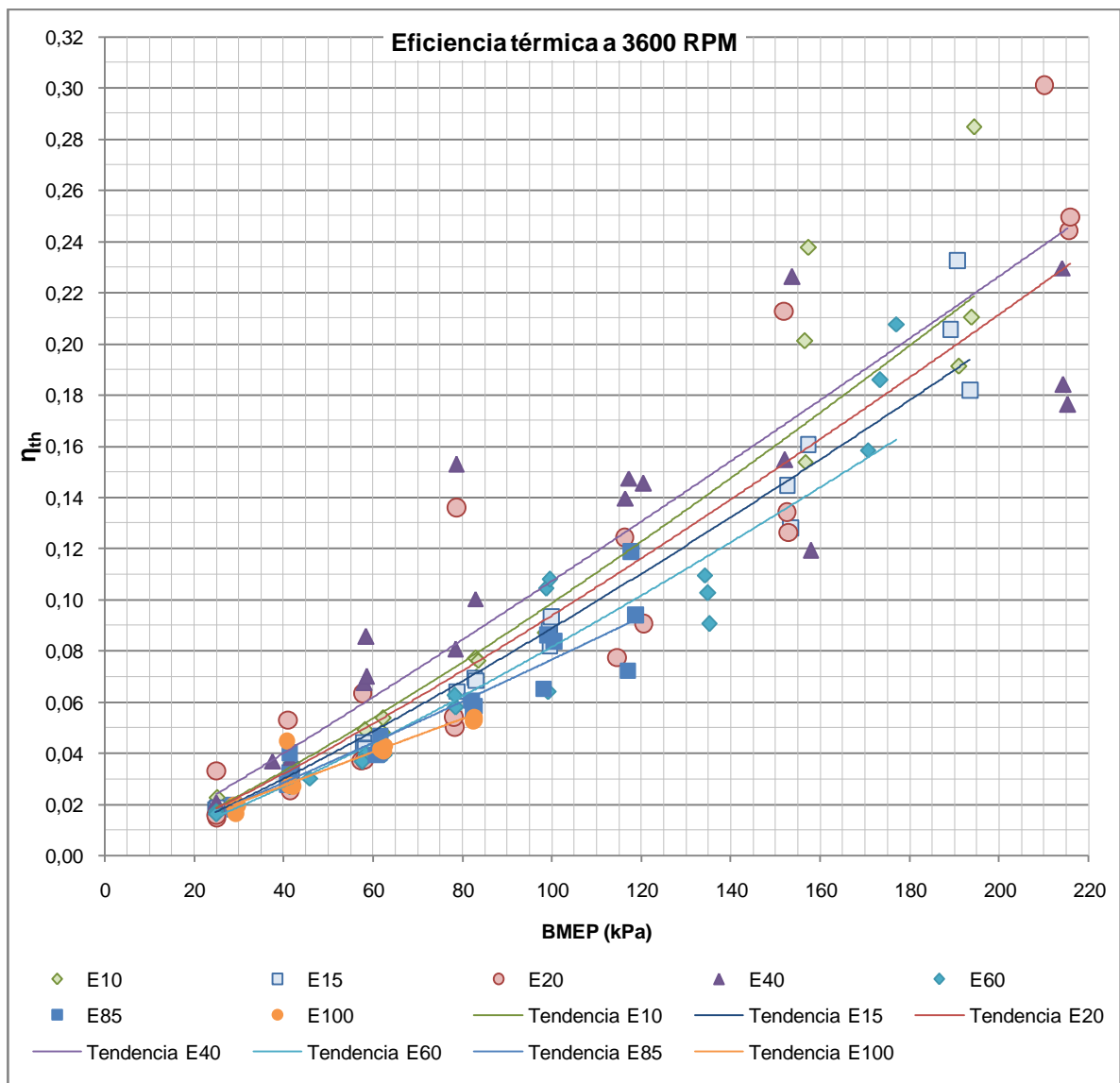


Gráfico 7 - Eficiencia térmica en función de la presión media efectiva al freno para 3600 RPM. Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico 7 se encuentran las curvas de eficiencia para 3600 RPM. Aquí se observa que los datos presentan una mayor dispersión que a 2700 RPM y las curvas se separan más entre sí, alcanzando una mayor eficiencia térmica comparada con 2700 RPM, aproximadamente 0.11 para 2700 RPM y 0.24 para 3600 RPM. Para esta condición E100 continúa siendo la menor eficiencia térmica y E40 se torna en la mezcla con mayor eficiencia, seguida muy de cerca por E10.

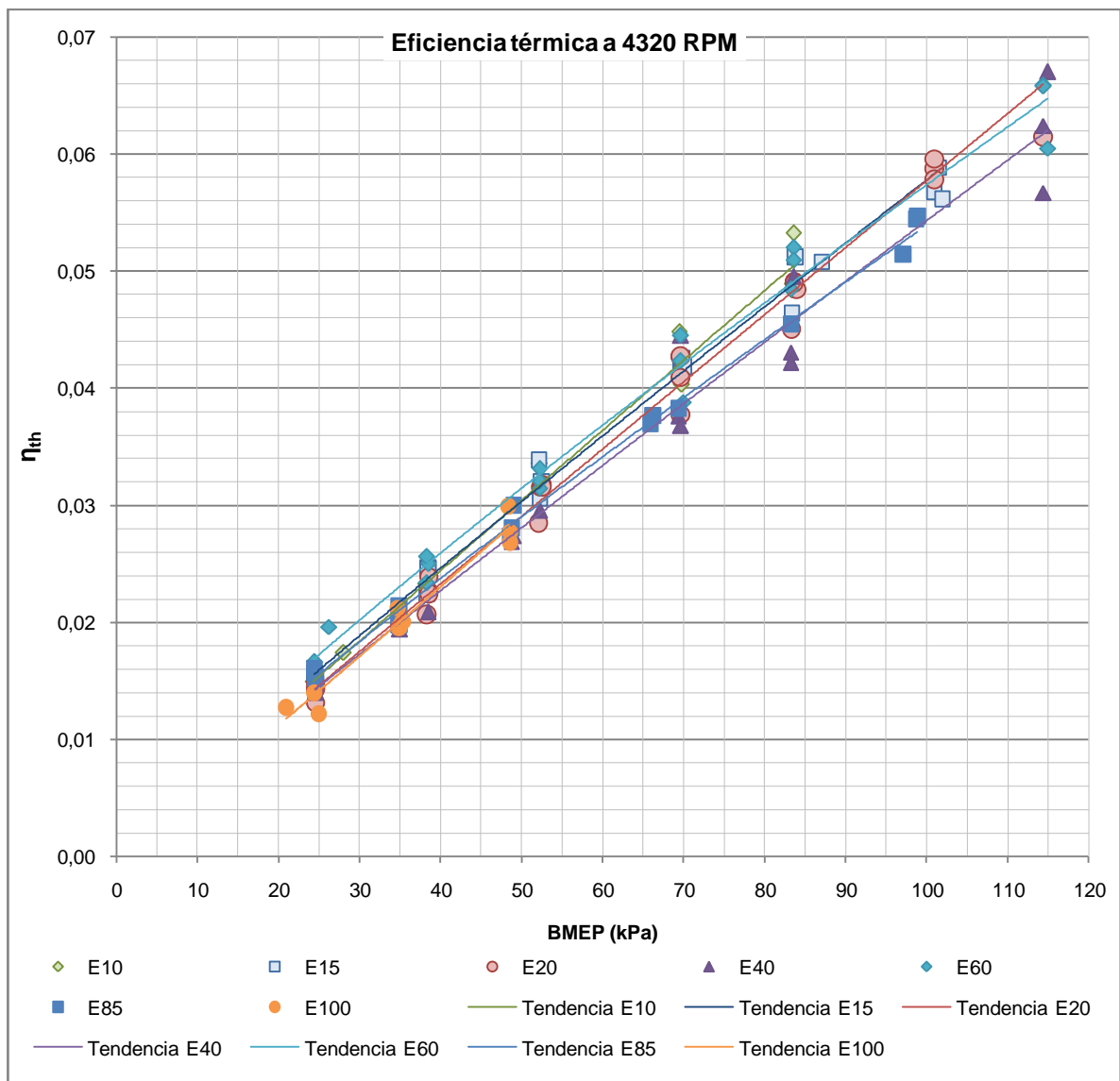


Gráfico 8 - Eficiencia térmica en función de la presión media efectiva al freno para 4320 RPM. Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico 8 se observan eficiencias térmicas mucho menores a las de las dos condiciones anteriores; no obstante presenta el mismo comportamiento creciente en 4320 RPM que para 2700 y 3600 RPM (gráficas 6 y 7). En esta condición las líneas de tendencia de las diferentes mezclas se cruzan en varios puntos y están muy cercanas, lo cual evita que sea una la mezcla la mayor o menor eficiencia en todo el intervalo.

Tabla 2 - Comparativo de eficiencia térmica respecto a E10 para cada velocidad del motor. Fuente: Elaboración propia.

Porcentaje de variación respecto a E10		
RPM	Mezcla	Variación
2700	E10	0,00%
	E15	-18,54%
	E20	-18,94%
	E40	-13,95%
	E60	-16,57%
	E85	-13,82%
	E100	-13,96%
3600	E10	0,00%
	E15	-10,88%
	E20	1,31%
	E40	24,55%
	E60	-18,82%
	E85	-12,09%
	E100	-14,80%
4320	E10	0,00%
	E15	1,48%
	E20	-4,62%
	E40	-10,43%
	E60	7,40%
	E85	-6,93%
	E100	-13,03%

En la tabla 2 se observa una reducción en la eficiencia térmica para todas las mezclas a 2700 RPM, aumentos pequeños para E20 a 3600 RPM, y para E15 y E60 a 4320 RPM, a diferencia de E40 a 3600 RPM, donde aumenta un 24.55%.

6.3 EMISIONES ESPECÍFICAS AL FRENO

Las emisiones contaminantes evaluadas son liberadas a la atmósfera junto a nitrógeno molecular (N_2), vapor de agua (H_2O) y el oxígeno molecular que no reaccionó en la combustión (O_2), que son los componentes básicos del aire atmosférico. Al observar las emisiones en conjunto se puede hacer una idea de cómo es el proceso de combustión para cada condición, teniendo en cuenta que en una combustión ideal se producirán únicamente CO_2 , N_2 y H_2O . En procesos de combustión incompleta se obtendrán menores CO_2 y aparecerán CO , HC y O_2

en las emisiones. La generación de NO_x depende tanto de la temperatura de gases de escape como de la combustión, luego un proceso de combustión que libere mayor energía aumentará en mayor medida la temperatura, generando mayores NO_x en las emisiones. Sin embargo si la combustión mejora se reduce el oxígeno disponible para reaccionar reduciendo a formación de NO_x .

6.3.1 BSCO₂

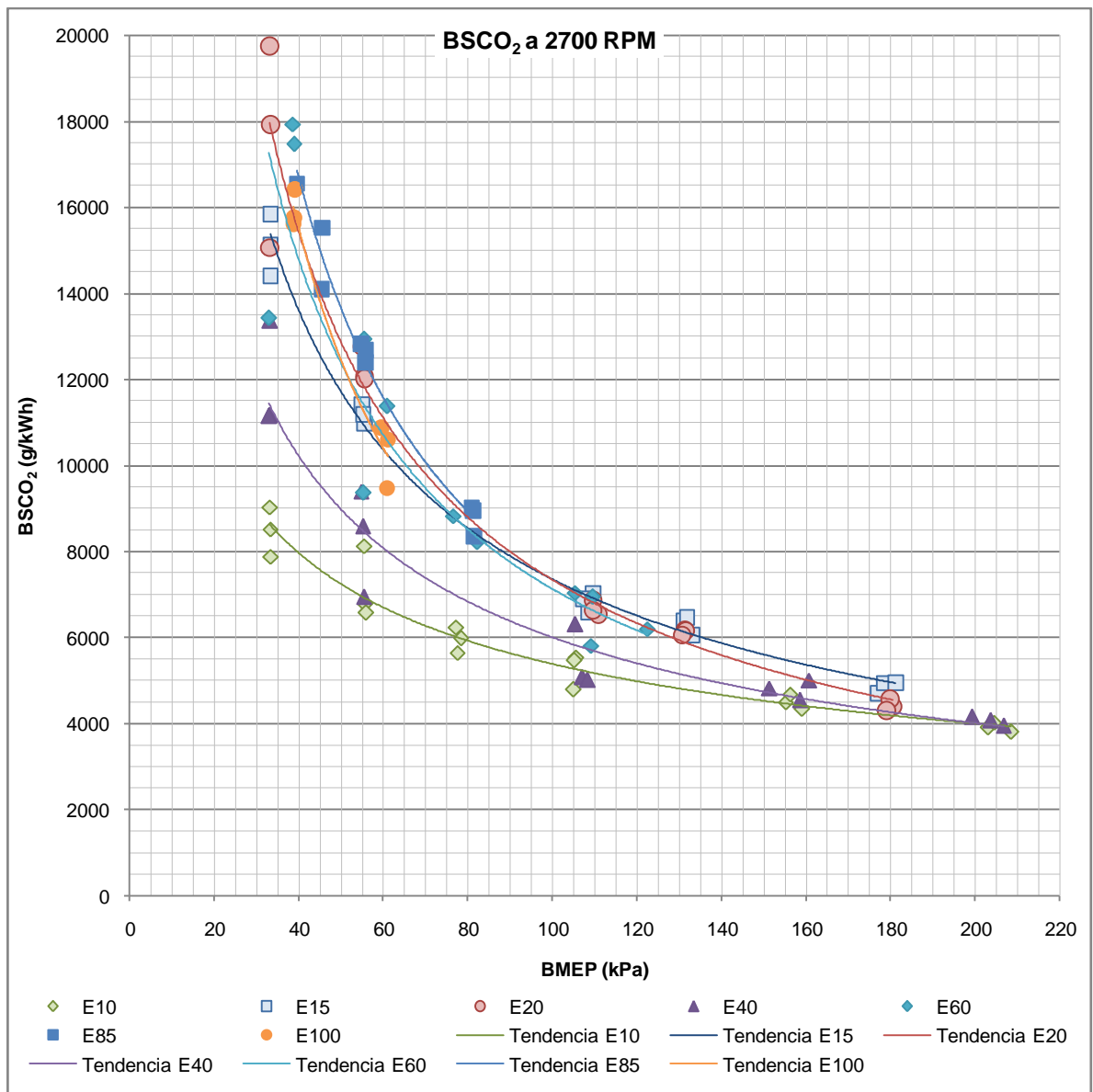


Gráfico 9 - Emisión específica de CO₂ al freno en función de la presión media efectiva al freno para 2700 RPM. Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico 9 para 2700 RPM se observa la menor emisión de BSCO₂ para la mezcla E10, seguida de la mezcla E40; las demás mezclas presentan unas emisiones muy similares entre ellas y mayores a las de las dos mezclas mencionadas anteriormente. Todas las mezclas presentan un comportamiento similar en una curva que decrece con el aumento de la potencia.

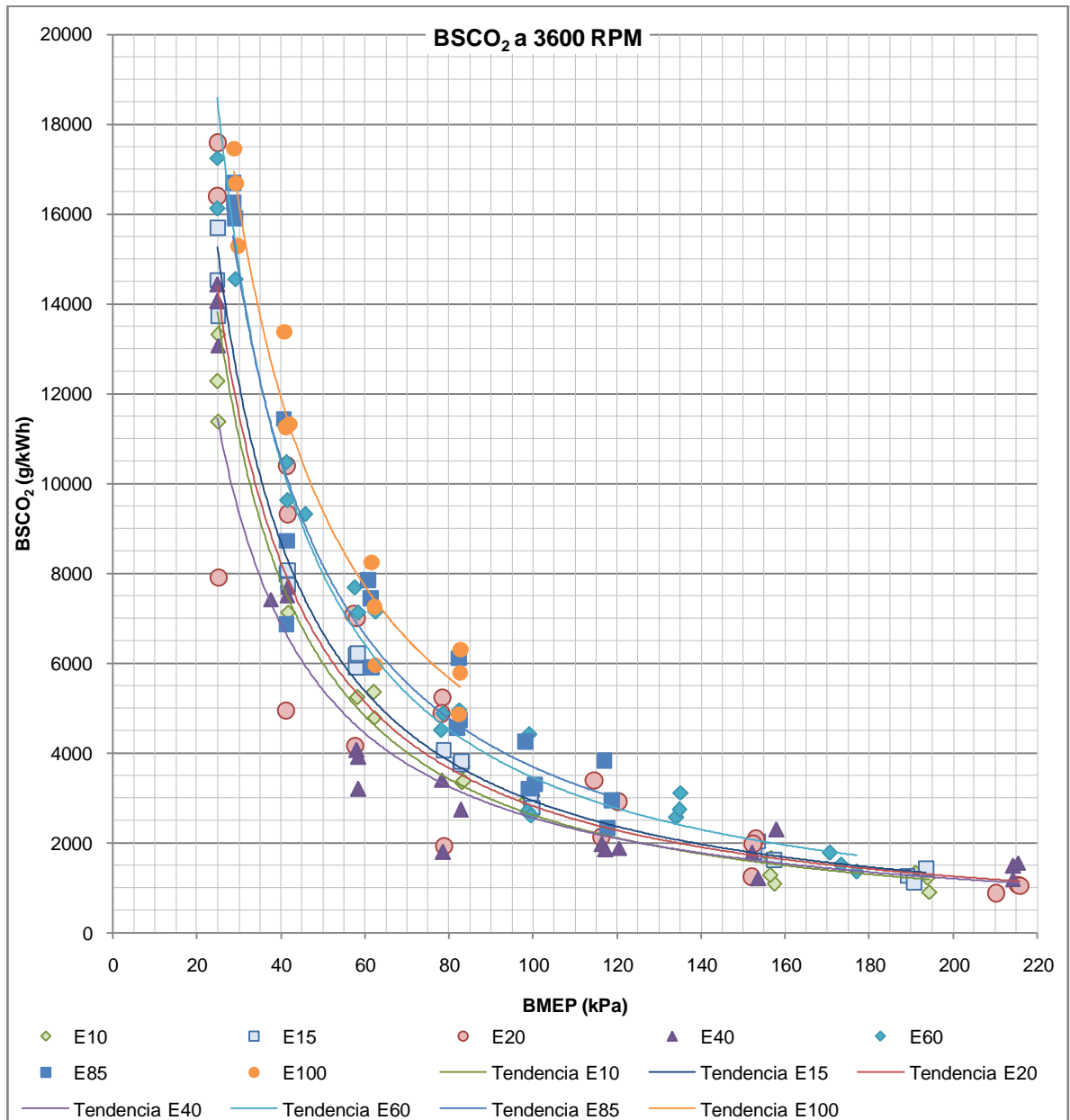


Gráfico 10 - Emisión específica de CO₂ al freno en función de la presión media efectiva al freno para 3600 RPM. Fuente: Elaboración propia.

El BSCO_2 para 3600 RPM se presenta en el gráfico 10, donde el comportamiento para todas las mezclas es decreciente y similar, observando en conjunto un mayor orden que para 2700 RPM, pues no se cortan entre ellas conservándose en estricto orden de menor a mayor E40, E10, E20, E15, E60, E85 y E100.

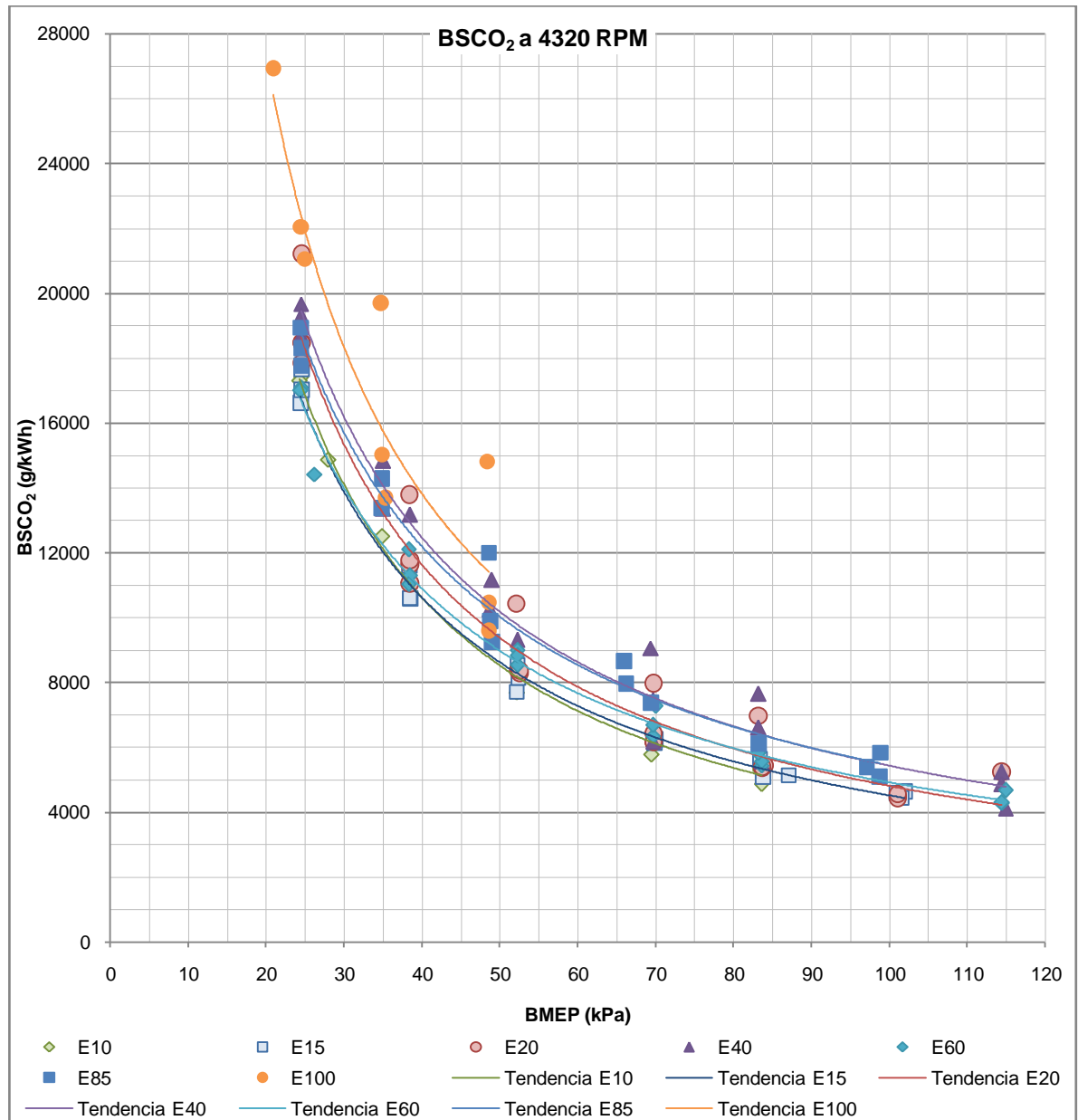


Gráfico 11 - Emisión específica de CO_2 al freno en función de la presión media efectiva al freno para 4320 RPM. Fuente: Elaboración propia.

Para 4320 RPM el comportamiento del BSCO_2 se observa en el gráfico 11, donde se aprecia una tendencia decreciente para todas las mezclas, cuyas curvas están más cercanas entre sí que para el caso de 3600 RPM, pero conservan un grado

de ordenamiento similar. Para esta condición la única mezcla que se aleja de las demás es E100 con una emisión mucho mayor a las de las demás mezclas evaluadas.

Tabla 3 - Comparativo de emisión específica de CO₂ al freno respecto a E10 para cada velocidad del motor. Fuente: Elaboración propia.

Porcentaje de variación respecto a E10		
RPM	Mezcla	Variación
2700	E10	0,00%
	E15	67,45%
	E20	89,55%
	E40	28,25%
	E60	74,41%
	E85	79,13%
	E100	66,12%
3600	E10	0,00%
	E15	13,65%
	E20	14,15%
	E40	-9,72%
	E60	34,86%
	E85	34,32%
	E100	48,66%
4320	E10	0,00%
	E15	-0,39%
	E20	9,78%
	E40	20,77%
	E60	1,92%
	E85	20,22%
	E100	41,65%

En la tabla 3 se presenta la comparación de BSCO₂ donde a 2700 RPM todas las mezclas aumentan considerablemente la emisión, siendo E40 el menor aumento y E20 el mayor. Para 3600 RPM E40 es la única mezcla que disminuye la emisión y el mayor aumento se presenta en E100. E15 y E20 presentan aumentos similares de magnitud media. E60 y E85 presentan aumentos similarmente grandes. Por último, para 4320 RPM se observa que para las mezclas E15 y E60 la variación es muy pequeña, para E40 y E85 el aumento es medio y para E100 el aumento es grande.

6.3.2 BSCO

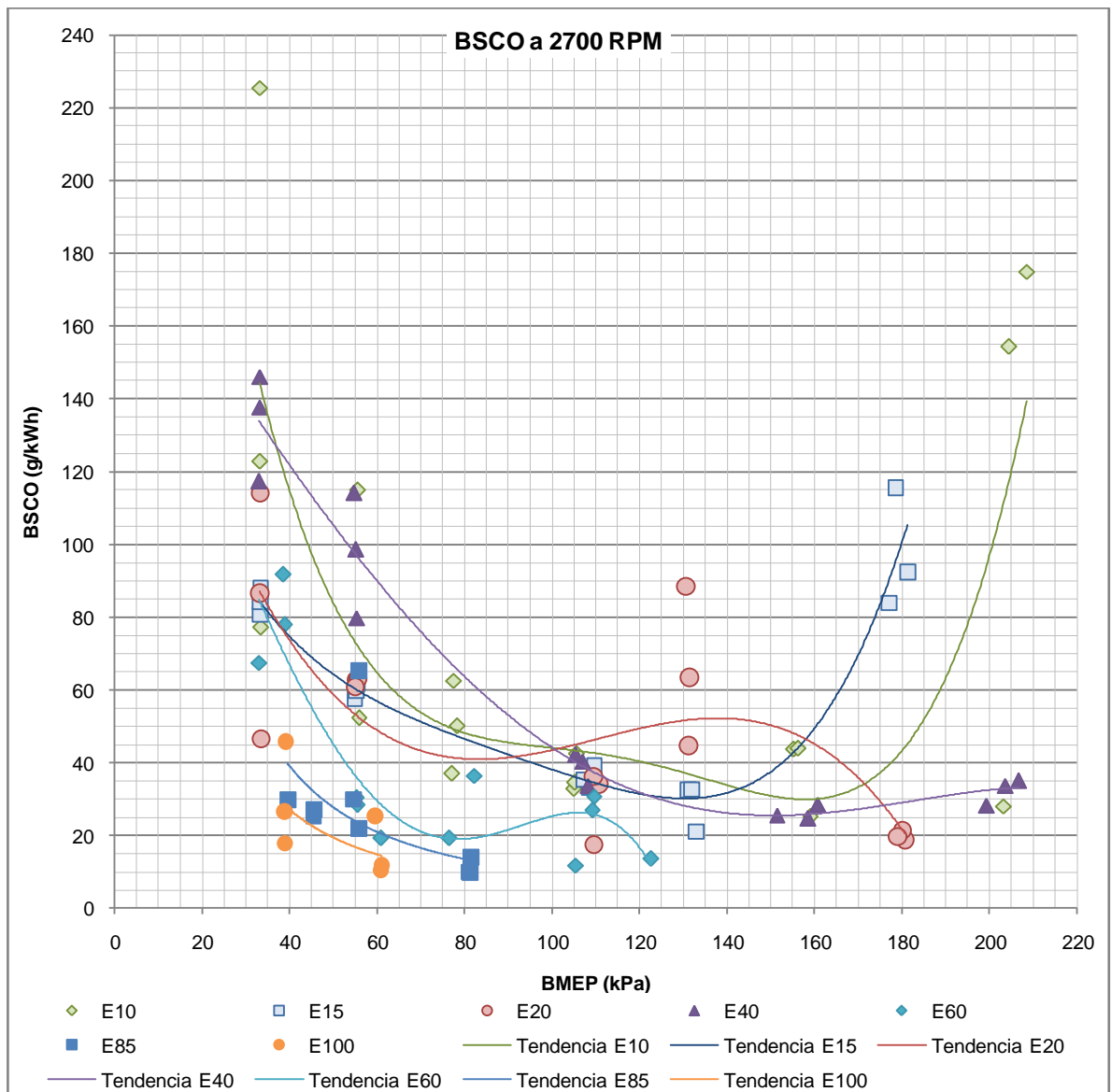


Gráfico 12 - Emisión específica de CO al freno en función de la presión media efectiva al freno para 2700 RPM. Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico 12 se observan las tendencias de BSCO para 2700 RPM, donde todas las mezclas presentan un comportamiento decreciente cuando comienza a subir la carga, no obstante para aproximadamente 100 kPa la tendencia de cada mezcla cambia: E20 y E60 suben sus emisiones y vuelven a bajar al llegar a la potencia máxima para cada mezcla; E10 y E15 bajan la velocidad con la que decrecen sus emisiones y luego crecen nuevamente de manera rápida antes de llegar a las máximas potencias; E 40 presenta un comportamiento similar a E10 y

E15, sin embargo el aumento de las emisiones al aumentar la potencia es marcadamente menor que el de estas mezclas; por ultimo E100 y E85 presentan un intervalo de potencia muy reducido durante el cual el comportamiento es decreciente. Para esta condición la dispersión de los datos para E10, E15, E20 y E40 es moderada.

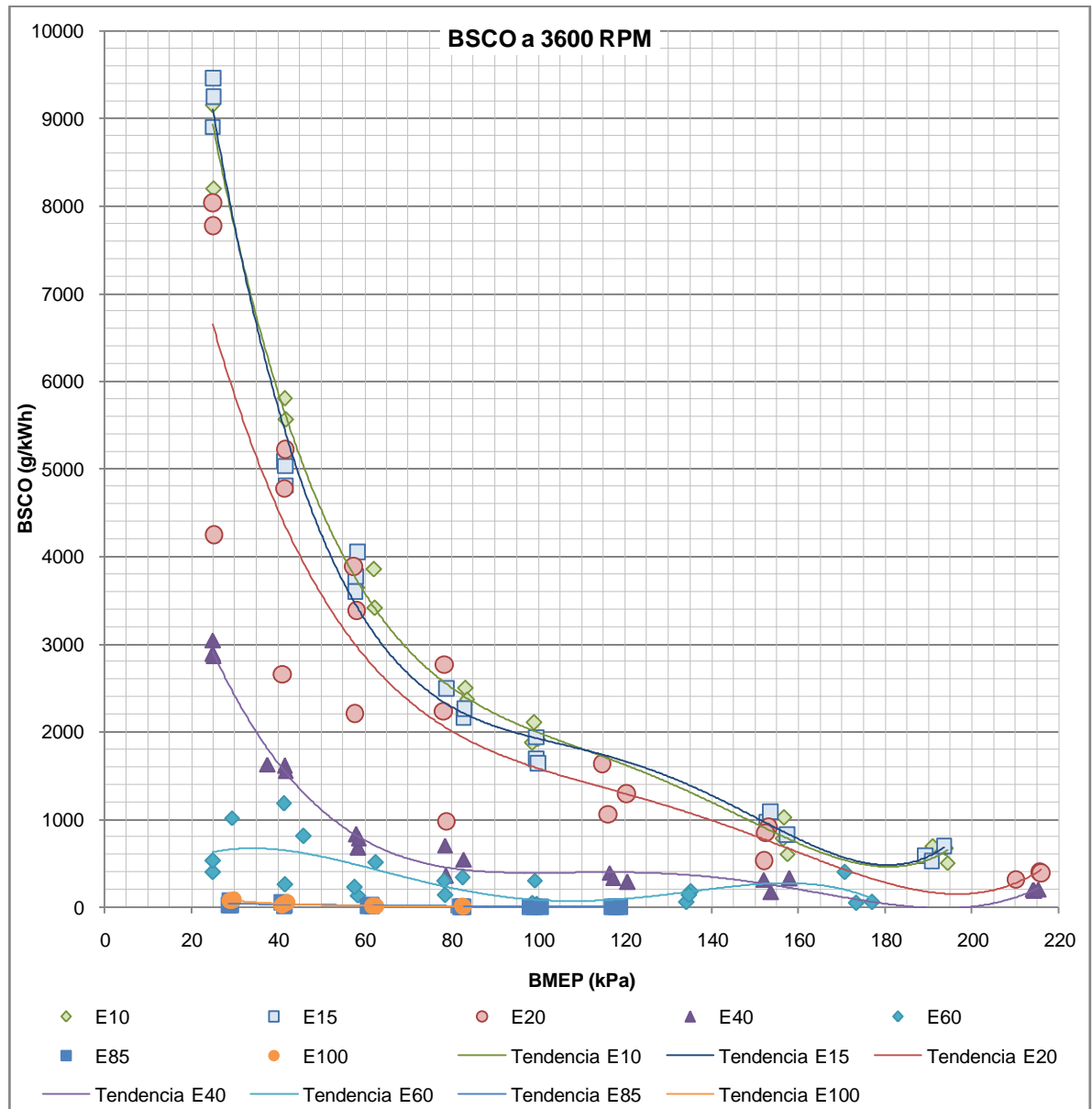


Gráfico 13 - Emisión específica de CO al freno en función de la presión media efectiva al freno para 3600 RPM. Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico 13 se observa el comportamiento para E10, E15 y E20, donde el BSCO comienza muy alto y decrece rápidamente hasta que suben las emisiones

nuevamente cerca al final de cada curva. E40 presenta un comportamiento similar con valores significativamente menores. E60 presenta unas bajas emisiones en general, con un comportamiento oscilante que termina decreciendo. Por último E85 y E100 presentan muy bajas emisiones con un comportamiento decreciente.

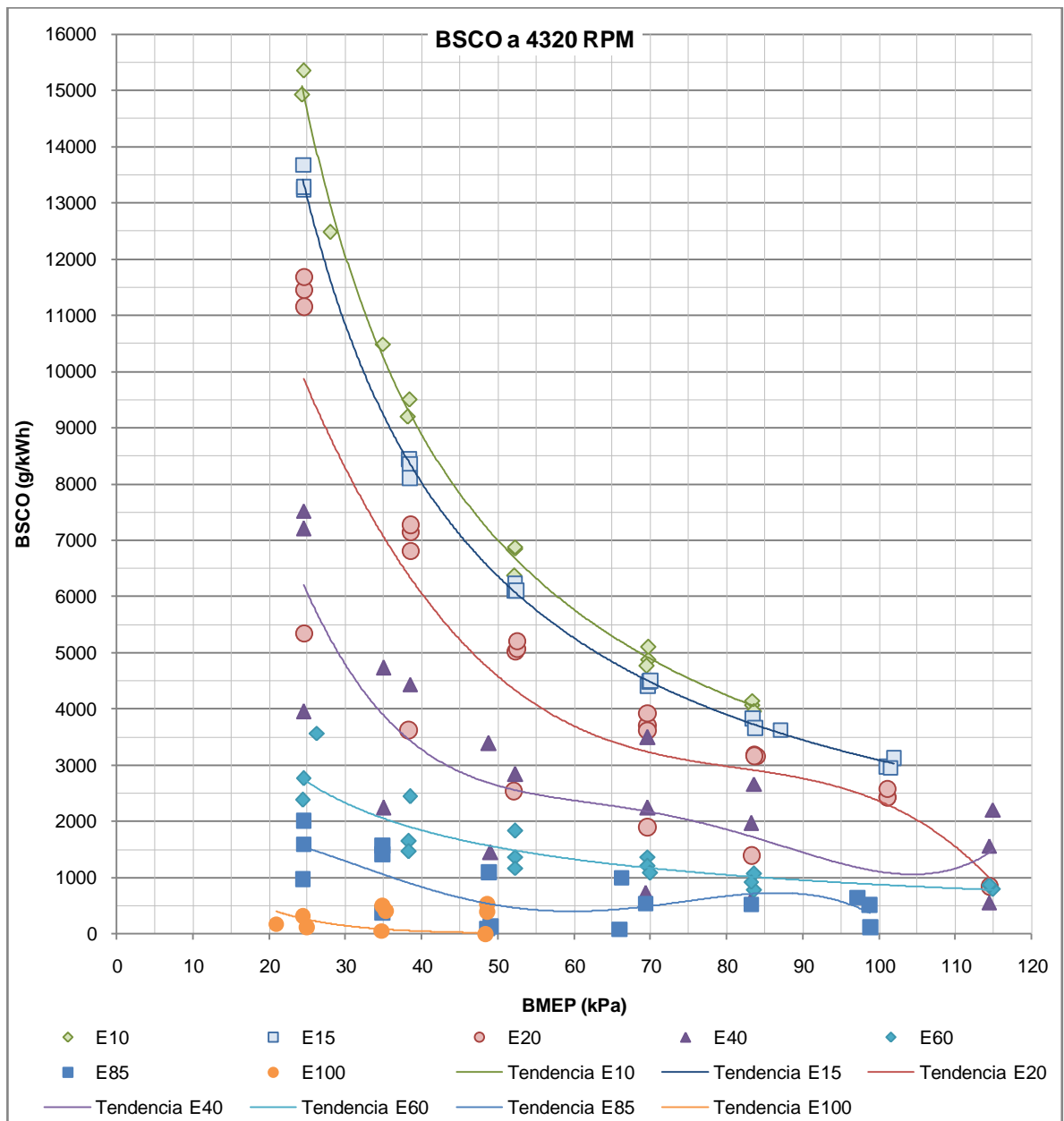


Gráfico 14 - Emisión específica de CO al freno en función de la presión media efectiva al freno para 4320 RPM. Fuente: Elaboración propia.

La última condición para BSCO , 4320 RPM, se presenta en el gráfico 14, donde se observa un comportamiento decreciente para todas las mezclas a baja

potencia, comportamiento que mantienen E10, E15, E20 y E100 mientras que E40 sube las emisiones nuevamente cerca de la máxima potencia, E60 decrece lentamente, E85 presenta oscilaciones para terminar decreciendo. Tanto para 4320 como para 3600 RPM la mayor emisión se presenta en la mezcla E10, seguida en orden por E15, E20, E40, E60, E85 y por último E100 con el menor BSCO para la condición de carga.

Tabla 4 - Comparativo de emisión específica de CO al freno respecto a E10 para cada velocidad del motor. Fuente: Elaboración propia.

Porcentaje de variación respecto a E10		
RPM	Mezcla	Variación
2700	E10	0,00%
	E15	-31,13%
	E20	-30,11%
	E40	10,94%
	E60	-55,14%
	E85	-64,73%
	E100	-78,97%
3600	E10	0,00%
	E15	-1,24%
	E20	-19,47%
	E40	-73,66%
	E60	-90,09%
	E85	-99,52%
	E100	-99,35%
4320	E10	0,00%
	E15	-9,61%
	E20	-33,32%
	E40	-59,66%
	E60	-79,63%
	E85	-90,37%
	E100	-96,90%

En la tabla 4 se presentan los comparativos respecto a E10, donde se observa una reducción de BSCO para 2700 RPM, para las mezclas E15 y E20 similares, un aumento ligero para E40 y una reducción cada vez mayor para las mezclas E60, E85 y E100. Para 3600 RPM el comportamiento es una reducción mayor conforme aumenta el contenido de etanol de la mezcla, donde para E85 y E100 la emisión se reduce en más del 99%. Por último para 4320 RPM el comportamiento

se reduce en forma progresiva con el contenido de etanol, llegando a 96.9% menos de BSCO en E100 que en E10.

6.3.3 BSNO_x

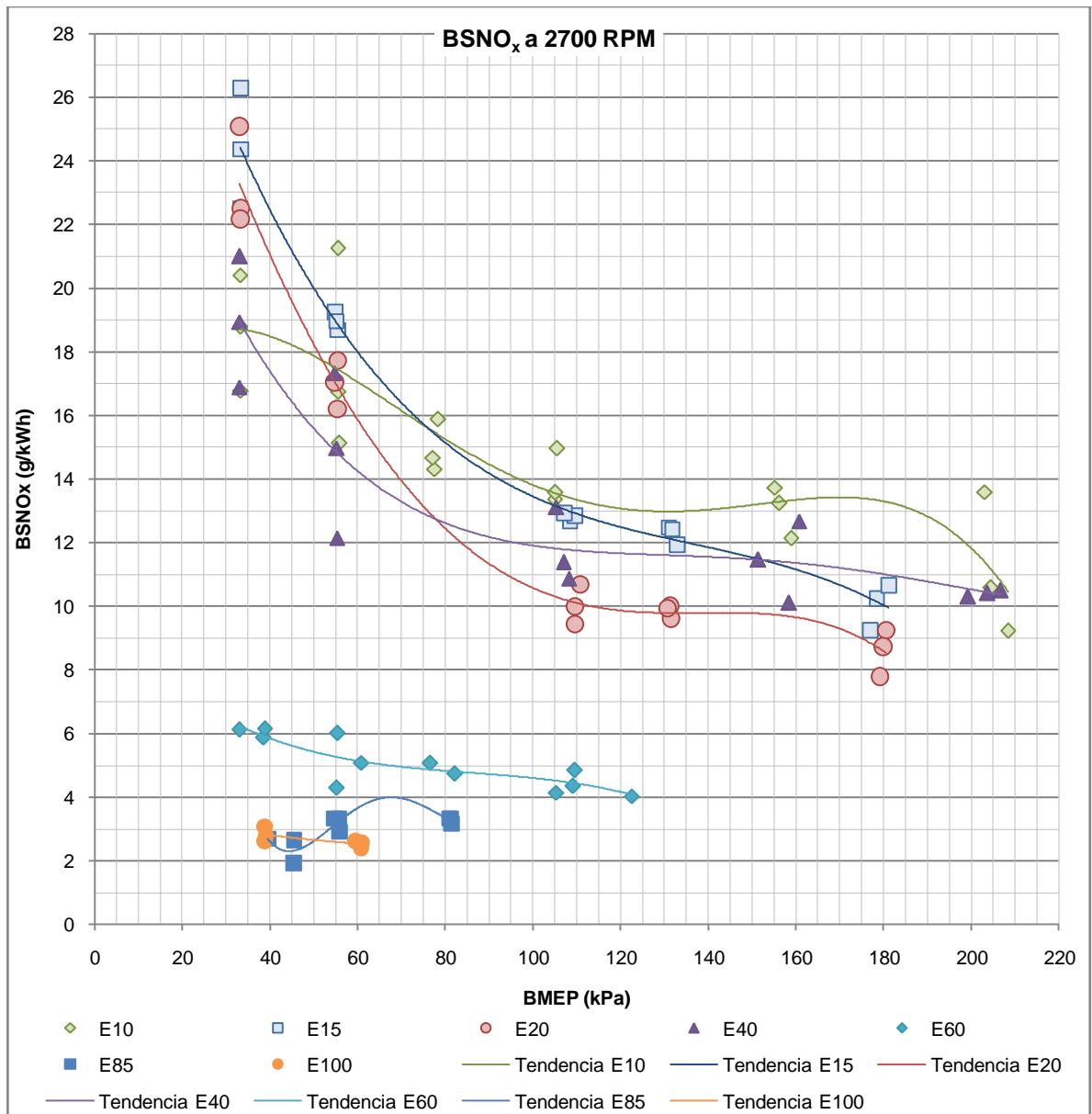


Gráfico 15 - Emisión específica de NO_x al freno en función de la presión media efectiva al freno para 2700 RPM. Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico 15 se presentan las emisiones de NO_x para 2700 RPM, donde se observan las mezclas E60, E85 y E100 con bajo BSNO_x; un comportamiento

decreciente para E60 y E100 y oscilante para E85, estando estas 3 mezclas cercanas en su valor de emisión específica. Las mezclas E15, E10, E40 y E20 presentan un BSNO_x significativamente mayor y un comportamiento decreciente, seguido por una zona de estabilidad y un descenso nuevamente hacia la máxima potencia.

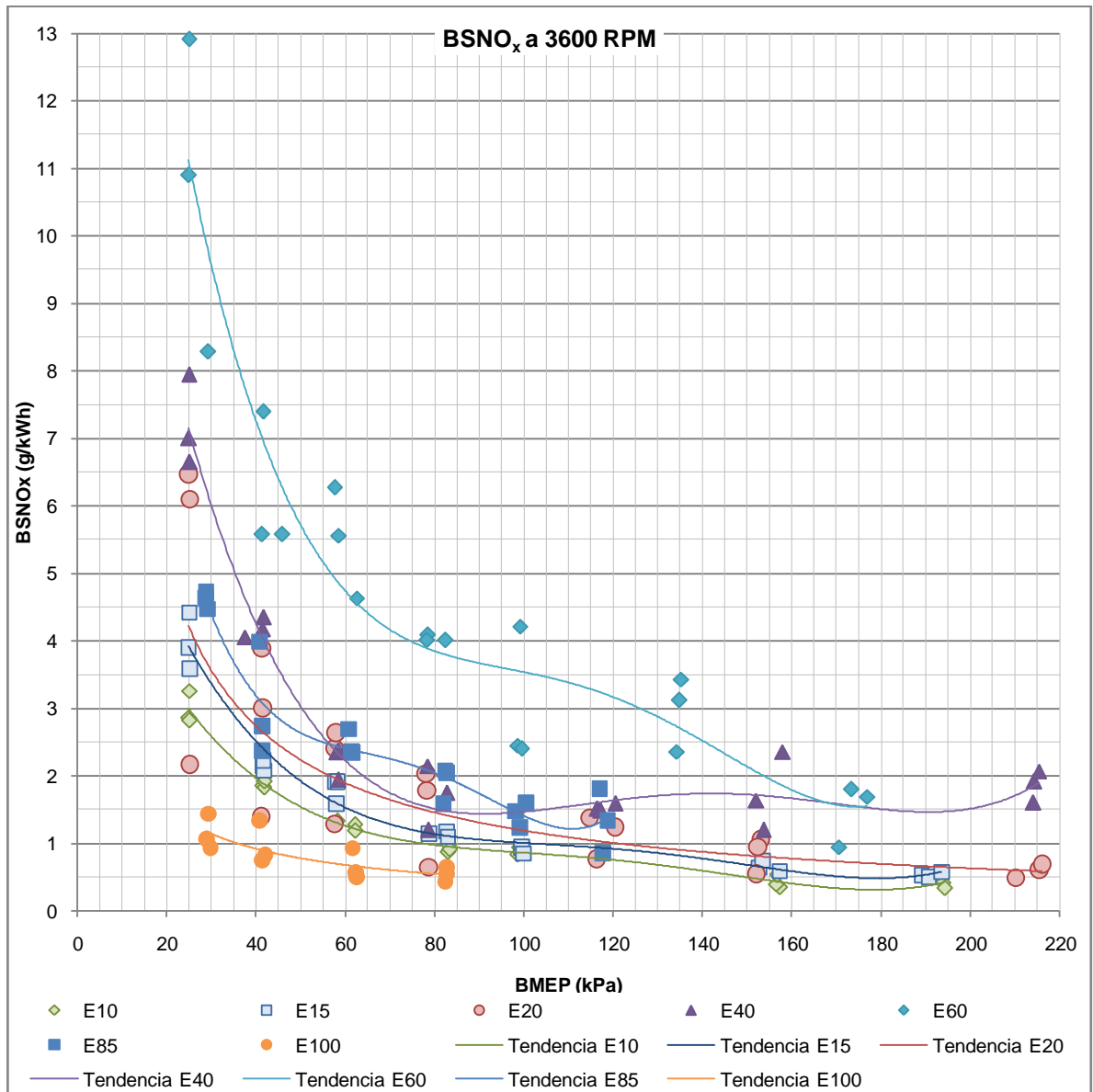


Gráfico 16 - Emisión específica de NO_x al freno en función de la presión media efectiva al freno para 3600 RPM. Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico 16 se observa el comportamiento decreciente de BSNO_x para todas las mezclas a 3600 RPM. La mayor emisión corresponde a E60 y ésta disminuye para E40, E85 E20, E15, E10 y E100 en su orden. La única variación a este orden

corresponde a una zona de potencia media donde E85 y E40 se cruzan presentando E40 menor emisión, sin embargo el cruce se repite teniendo nuevamente E85 mayores emisiones a mayor potencia.

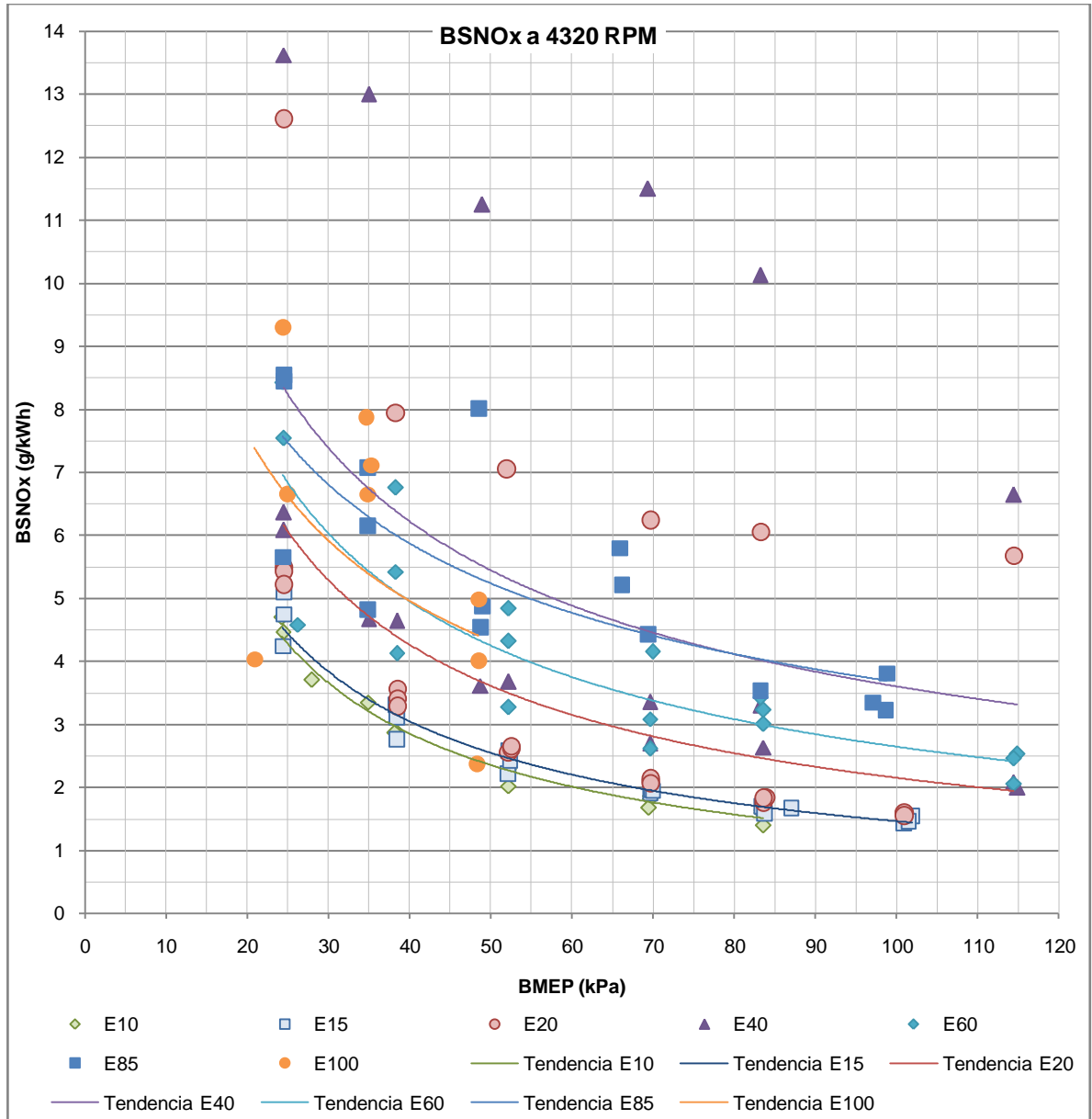


Gráfico 17 - Emisión específica de NO_x al freno en función de la presión media efectiva al freno para 4320 RPM. Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico 17, que presenta el BSNO_x para 4320 RPM, se aprecia que los datos tienen dispersiones grandes, especialmente las mezclas E40, E20 y E85 en las cuales los datos de una de las tomas está significativamente por encima de los datos arrojados por las otras dos tomas experimentales; no obstante cada toma

presenta el mismo comportamiento decreciente pero desplazado en el eje vertical. Para E100 la dispersión de los datos es mayor en las 3 tomas experimentales. Todas las mezclas evaluadas presentan un comportamiento decreciente en todo el intervalo.

Tabla 5 - Comparativo de emisión específica de NO_x al freno respecto a E10 para cada velocidad del motor. Fuente: Elaboración propia.

Porcentaje de variación respecto a E10		
RPM	Mezcla	Variación
2700	E10	0,00%
	E15	18,93%
	E20	10,30%
	E40	-7,38%
	E60	-69,31%
	E85	-84,43%
	E100	-85,24%
3600	E10	0,00%
	E15	28,75%
	E20	60,61%
	E40	106,25%
	E60	289,69%
	E85	79,72%
	E100	-49,12%
4320	E10	0,00%
	E15	6,85%
	E20	62,46%
	E40	143,22%
	E60	75,90%
	E85	113,13%
	E100	88,68%

En la tabla 5 se presentan las variaciones respecto a E10, donde observamos un aumento de BSNO_x para 2700 RPM en las mezclas E15 y E20, y una reducción cada vez mayor para E40, E60, E85 y E100. En el caso de 3600 RPM se presenta un aumento progresivo para E15, E20, E40 y E60. Para E85 hay un aumento menor al de E60 y para E100 hay una reducción de la emisión. Por último, para 4320 RPM se observa un aumento pequeño para E15, y cada vez mayor para las mezclas E20, E60, E100, E60 y E40 sucesivamente.

6.3.4 BSHC

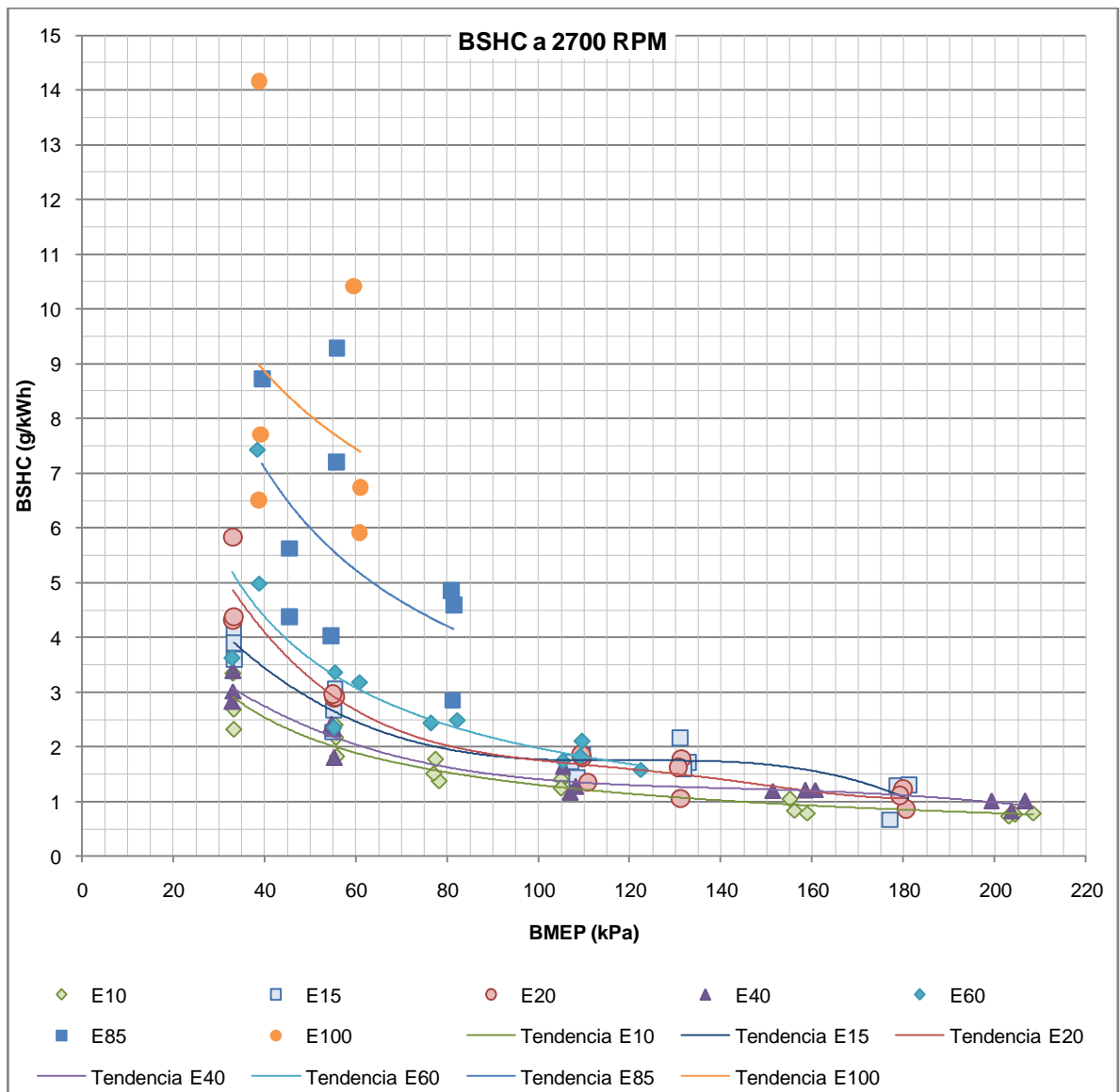


Gráfico 18 - Emisión específica de HC al freno en función de la presión media efectiva al freno para 2700 RPM. Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico 18 se encuentra el BSHC para 2700 RPM, aquí se observa una dispersión muy alta de los datos para E100, que presenta las mayores emisiones con una tendencia decreciente; E85 presenta una dispersión grande pero menor a la de E100 y una tendencia decreciente con menores emisiones que E100. Las demás mezclas presentan un comportamiento similar, con una tendencia decreciente, rápida para bajas potencias y más lenta para mayores potencias. La

menor emisión de HC se encuentra para E10, seguida de E40. E15 y E20 se cruzan teniendo menores emisiones, E15 a bajas potencias y E20 a mayores.

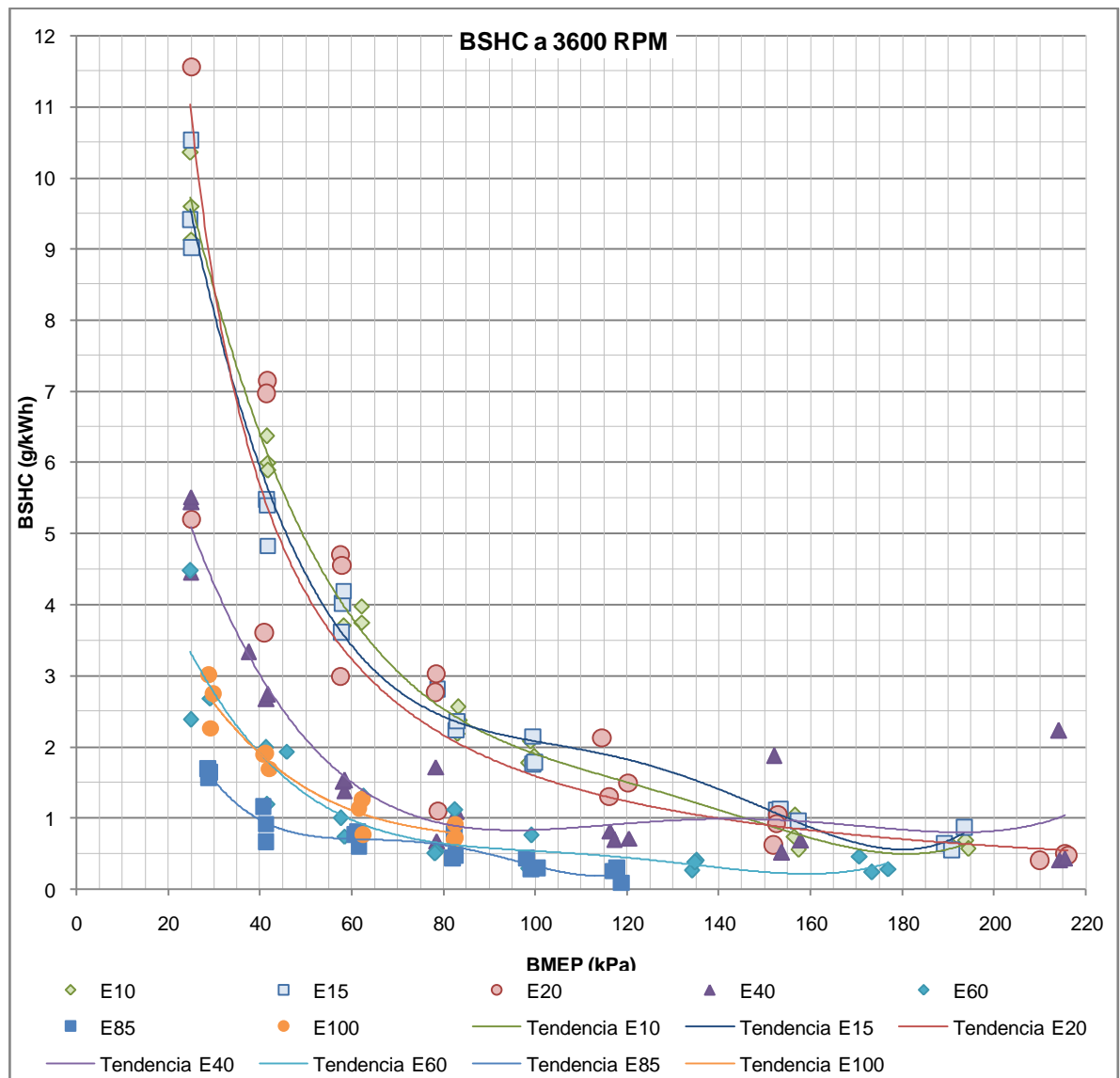


Gráfico 19 - Emisión específica de HC al freno en función de la presión media efectiva al freno para 3600 RPM. Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico 19 se observa un comportamiento decreciente similar de BSHC para todas las mezclas a 3600 RPM, donde E20, E10 y E15 presentan, a baja potencia, las mayores emisiones, E40 emisiones medias y E60, E85 y E100 emisiones bajas. A altas potencias todas las mezclas presentan una cantidad similar de emisiones en un rango bajo.

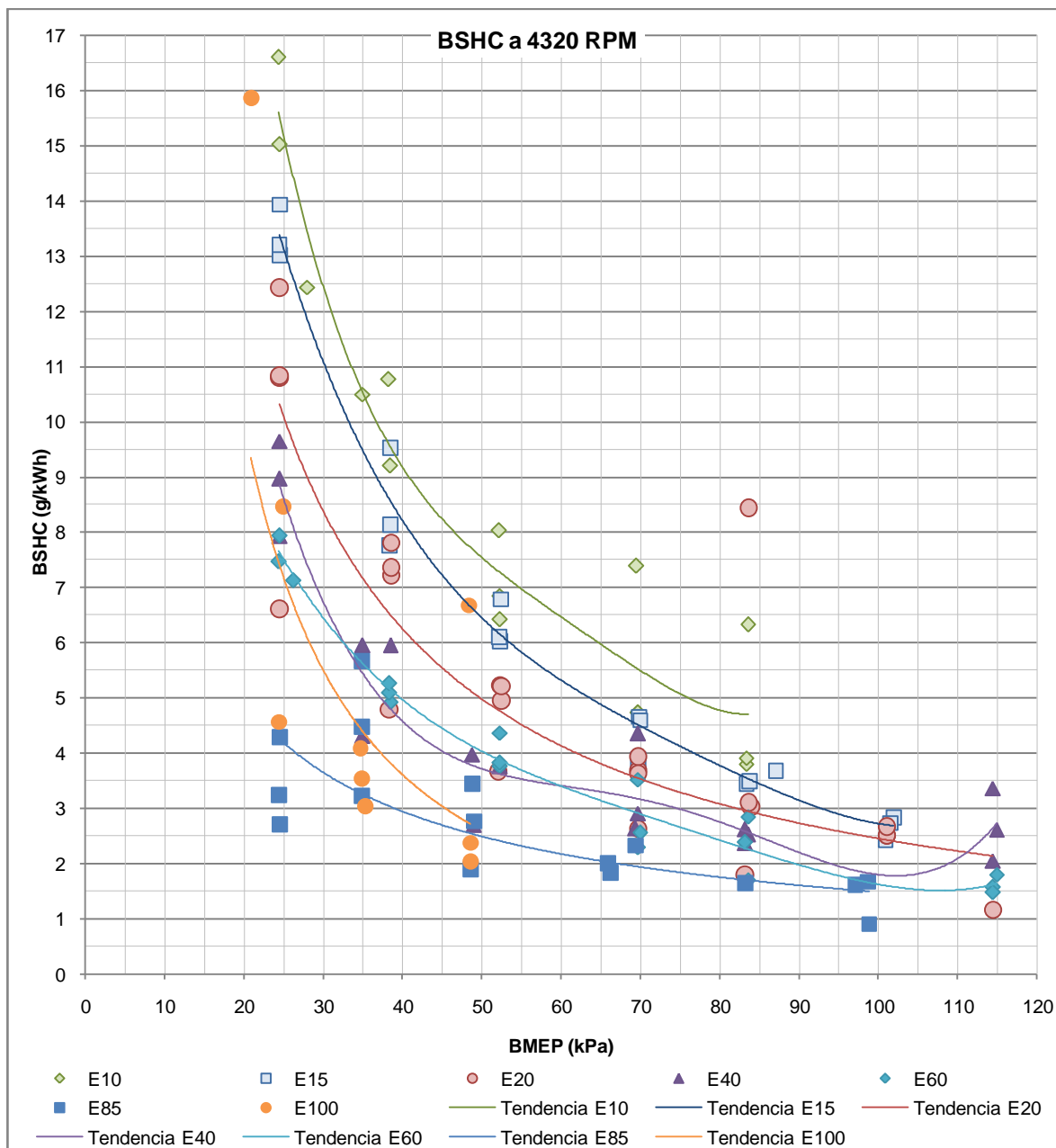


Gráfico 20 - Emisión específica de HC al freno en función de la presión media efectiva al freno para 4320 RPM. Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico 20 se presentan BSHC a 4320 RPM. Todas las mezclas presentan un comportamiento decreciente similar; con E10 presenta las mayores emisiones, seguido de E15 y E20; E40 y E60 se cruzan encontrándose estas dos mezclas con menores emisiones que las 3 anteriores. E85 presenta las menores emisiones y por último E100 presenta un comportamiento decreciente aunque con una dispersión muy grande en sus datos, especialmente a mínima potencia.

Tabla 6 - Comparativo de emisión específica de HC al freno respecto a E10 para cada velocidad del motor. Fuente: Elaboración propia.

Porcentaje de variación respecto a E10		
RPM	Mezcla	Variación
2700	E10	0,00%
	E15	32,76%
	E20	55,84%
	E40	6,77%
	E60	65,87%
	E85	173,13%
	E100	250,98%
3600	E10	0,00%
	E15	-1,67%
	E20	1,62%
	E40	-52,88%
	E60	-70,58%
	E85	-81,23%
	E100	-70,38%
4320	E10	0,00%
	E15	-12,15%
	E20	-32,23%
	E40	-45,86%
	E60	-47,54%
	E85	-64,91%
	E100	-49,08%

En la tabla 6 encontramos para 2700 RPM un aumento de emisiones, E40 con el menor aumento seguido de manera progresiva de E15, E20, E60, E85 y el mayor aumento E100. Para 3600 RPM se presenta una variación muy pequeña para E15 y E20, y una reducción de menor a mayor para las mezclas E40, E100, E60 y E85. Para 4320 RPM se presenta una reducción pequeña para E15, media para E20, y ligeramente mayor que para E20 para las mezclas E60, E40 y E100, la mayor reducción en esta velocidad se presenta para la mezcla E85.

6.4 PORCENTAJES GENERALES DE VARIACIÓN RESPECTO A E10

Con los datos calculados para el porcentaje de variación respecto a E10 para cada condición, se promedian para presentar un porcentaje de variación general.

Tabla 7 - Porcentajes generales de variación respecto a E10. Fuente: Elaboración propia.

	Mezcla	Variación
BSFC	E15	2,48%
	E20	0,82%
	E40	4,99%
	E60	6,51%
	E85	18,58%
	E100	32,46%
Eficiencia térmica	E15	-9,32%
	E20	-7,42%
	E40	0,06%
	E60	-9,33%
	E85	-10,95%
	E100	-13,93%
BSCO ₂	E15	26,90%
	E20	37,82%
	E40	13,10%
	E60	37,06%
	E85	44,56%
	E100	52,14%
BSCO	E15	-13,99%
	E20	-27,63%
	E40	-40,79%
	E60	-74,95%
	E85	-84,87%
	E100	-91,74%
BSNO _x	E15	18,18%
	E20	44,46%
	E40	80,70%
	E60	98,76%
	E85	36,14%
	E100	-15,23%
BSHC	E15	6,31%
	E20	8,41%
	E40	-30,65%
	E60	-17,42%
	E85	9,00%
	E100	43,84%

6.5 MODELO ESTADÍSTICO: LÍNEAS DE TENDENCIA

Según las fuentes consultadas [48] [49], para la cantidad de datos recolectados se sugiere una regresión lineal utilizando el factor de correlación al cuadrado como indicador de lo bueno que es el ajuste de la regresión a los datos, es decir, lo fuerte que es la relación entre la variable independiente y la variable dependiente. Esta regresión se presenta como una línea de tendencia, que si bien no conecta directamente los puntos, muestra su tendencia.

En esta sección se presentan las tablas de las regresiones graficadas como línea de tendencia para los datos en cada una de las gráficas de 2 a 20.

Del procedimiento seguido para encontrar la mejor aproximación a los datos medidos, se obtuvieron regresiones de tipo potencial con la forma $y=Ax^B$, de tipo exponencial con la forma $y=Ae^x$ y de tipo polinómica de grados 3 y 4 con las formas $y=Ax^3+Bx^2+Cx+D$ y $y=Ax^4+Bx^3+Cx^2+Dx+E$ respectivamente. Se evitó utilizar polinomios de mayor grado debido a que con el reducido número de datos disponibles, un polinomio de mayor grado presentaría un R^2 muy grande sin corresponder a la tendencia real de las mediciones. Las ecuaciones de estas regresiones y sus correspondientes coeficientes de correlación al cuadrado se generaron automáticamente en Excel que utiliza el método de los mínimos cuadrados.

En las tablas se presenta el tipo de regresión que se ajustó a los datos de cada mezcla; la ecuación de esta regresión debe leerse **y** como la variable independiente y **x** como BMEP. Para el primer ejemplo:

$$BSFC_{a\ 2700\ RPM\ para\ E10} \cong 78798 \cdot BMEP^{-0.89}$$

En las tablas se marcan en fondo verde los R^2 mayores o iguales a 0.85 considerados muy buenos, porque corresponden a series con una marcada tendencia y baja dispersión. Se marcan en fondo rojo los R^2 menores o iguales a 0.40 como alerta, pues estas series presentan una dispersión muy grande por lo cual la tendencia no es tan clara. Por último los R^2 con fondo blanco son los valores medios, cuyos datos presentan una dispersión moderada y la tendencia es marcada. Los umbrales de 0.85 y 0.40 se escogieron observando lo bien que la línea de tendencia se ajusta a los datos y la dispersión de los mismos, pues el

parámetro R^2 no tiene un valor de aceptación o rechazo fijo en la literatura [48] [50], ya que depende del tipo de experimento y la dispersión de los datos.

Tabla 8 - Tendencias BSFC. Fuente: Elaboración propia.

RPM	Mezcla	Tipo de tendencia	Ecuación	R^2
2700	E10	Potencial	$y = 86688x^{-0,89}$	0,995
	E15	Potencial	$y = 85306x^{-0,87}$	0,995
	E20	Potencial	$y = 86552x^{-0,87}$	0,996
	E40	Potencial	$y = 99901x^{-0,88}$	0,999
	E60	Potencial	$y = 12034x^{-0,90}$	0,993
	E85	Potencial	$y = 38897x^{-1,16}$	0,786
	E100	Potencial	$y = 20255x^{-0,97}$	0,998
3600	E10	Potencial	$y = 13271x^{-0,91}$	0,995
	E15	Potencial	$y = 14194x^{-0,93}$	0,999
	E20	Potencial	$y = 12905x^{-0,91}$	0,998
	E40	Potencial	$y = 12757x^{-0,91}$	0,999
	E60	Potencial	$y = 11647x^{-0,89}$	0,996
	E85	Potencial	$y = 14446x^{-0,93}$	0,994
	E100	Potencial	$y = 16577x^{-0,95}$	0,860
4320	E10	Potencial	$y = 17292x^{-0,96}$	0,999
	E15	Potencial	$y = 17107x^{-0,96}$	0,999
	E20	Potencial	$y = 15874x^{-0,96}$	0,979
	E40	Potencial	$y = 14164x^{-0,92}$	0,985
	E60	Potencial	$y = 12390x^{-0,88}$	0,998
	E85	Potencial	$y = 15334x^{-0,91}$	0,993
	E100	Potencial	$y = 48332x^{-1,19}$	0,808

En la tabla 8 se presentan las tendencias encontradas para BSFC, donde se observa que la mayoría de las regresiones cuentan con un R^2 muy bueno, indicando una fuerte correlación y una baja dispersión de los datos. Estas mediciones son altamente repetibles y presentan un ajuste adecuado. Todas las curvas ajustaron bien a la regresión de tipo potencial.

Tabla 9 - Tendencias eficiencia térmica. Fuente: Elaboración propia.

RPM	Mezcla	Tipo de tendencia	Ecuación	R ²
2700	E10	Potencial	$y = 0,0020x^{0,7495}$	0,9774
	E15	Potencial	$y = 0,0010x^{0,8775}$	0,9961
	E20	Potencial	$y = 0,0010x^{0,8755}$	0,9952
	E40	Potencial	$y = 0,0013x^{0,8389}$	0,9945
	E60	Potencial	$y = 0,0009x^{0,9047}$	0,9936
	E85	Potencial	$y = 0,0003x^{1,1672}$	0,7868
	E100	Potencial	$y = 0,0007x^{0,9752}$	0,9981
3600	E10	Potencial	$y = 0,0004x^{1,1963}$	0,9721
	E15	Potencial	$y = 0,0004x^{1,1818}$	0,9902
	E20	Potencial	$y = 0,0004x^{1,1719}$	0,8751
	E40	Potencial	$y = 0,0008x^{1,0776}$	0,9109
	E60	Potencial	$y = 0,0003x^{1,2080}$	0,9597
	E85	Potencial	$y = 0,0005x^{1,0761}$	0,9407
	E100	Potencial	$y = 0,0008x^{0,9634}$	0,8637
4320	E10	Potencial	$y = 0,0006x^{0,9876}$	0,9938
	E15	Potencial	$y = 0,0008x^{0,9318}$	0,9937
	E20	Potencial	$y = 0,0006x^{0,9910}$	0,9914
	E40	Potencial	$y = 0,0007x^{0,9525}$	0,9869
	E60	Potencial	$y = 0,0011x^{0,8667}$	0,9897
	E85	Potencial	$y = 0,0009x^{0,8942}$	0,9948
	E100	Potencial	$y = 0,0005x^{1,0399}$	0,9574

En la tabla 9 se presentan las regresiones para la eficiencia térmica, donde la mayoría de R² son muy buenos indicando una alta correlación y baja dispersión. Estas curvas presentan un buen ajuste a los datos experimentales. Todas las curvas ajustaron bien a la regresión de tipo potencial.

Tabla 10 - Tendencias BSCO₂. Fuente: Elaboración propia.

RPM	Mezcla	Tipo de tendencia	Ecuación	R ²
2700	E10	Potencial	$y = 38365x^{-0,43}$	0,952
	E15	Potencial	$y = 16083x^{-0,67}$	0,992
	E20	Potencial	$y = 30685x^{-0,81}$	0,985
	E40	Potencial	$y = 86975x^{-0,58}$	0,947
	E60	Potencial	$y = 28058x^{-0,79}$	0,883
	E85	Potencial	$y = 45723x^{-0,89}$	0,981
	E100	Potencial	$y = 59349x^{-0,98}$	0,963
3600	E10	Potencial	$y = 64576x^{-1,19}$	0,972
	E15	Potencial	$y = 67935x^{-1,18}$	0,990
	E20	Potencial	$y = 62193x^{-1,17}$	0,875
	E40	Potencial	$y = 36672x^{-1,07}$	0,910
	E60	Potencial	$y = 90220x^{-1,20}$	0,959
	E85	Potencial	$y = 72398x^{-1,14}$	0,919
	E100	Potencial	$y = 61927x^{-1,07}$	0,947
4320	E10	Potencial	$y = 40548x^{-0,98}$	0,993
	E15	Potencial	$y = 33020x^{-0,93}$	0,993
	E20	Potencial	$y = 40535x^{-0,96}$	0,958
	E40	Potencial	$y = 35452x^{-0,90}$	0,959
	E60	Potencial	$y = 26646x^{-0,86}$	0,989
	E85	Potencial	$y = 31160x^{-0,87}$	0,978
	E100	Potencial	$y = 51694x^{-0,98}$	0,821

En la tabla 10 se presentan las regresiones para BSCO₂ donde nuevamente se tienen muy buenos R², baja dispersión y alta repetitividad. Todas las curvas ajustaron bien a la regresión de tipo potencial.

Tabla 11 - Tendencias BSCO. Fuente: Elaboración propia.

RPM	Mezcla	Tipo de tendencia	Ecuación	R ²
2700	E10	Polinómica 4	$y = 2E-06x^4 - 0,001x^3 + 0,185x^2 - 14,01x + 441,8$	0,574
	E15	Polinómica 4	$y = 1E-06x^4 - 0,0005x^3 + 0,070x^2 - 4,770x + 182,2$	0,930
	E20	Polinómica 3	$y = -0,0001x^3 + 0,046x^2 - 4,790x + 200,2$	0,553
	E40	Polinómica 4	$y = -2E-07x^4 + 9E-05x^3 - 0,003x^2 - 1,766x + 193,4$	0,962
	E60	Polinómica 4	$y = -6E-06x^4 + 0,001x^3 - 0,087x^2 - 0,518x + 154,8$	0,801
	E85	Potencial	$y = 11454x^{-1,54}$	0,503
	E100	Potencial	$y = 6588,x^{-1,49}$	0,425
3600	E10	Polinómica 4	$y = 6E-05x^4 - 0,029x^3 + 5,591x^2 - 478,0x + 17799$	0,990
	E15	Polinómica 4	$y = 7E-05x^4 - 0,036x^3 + 6,791x^2 - 558,4x + 19318$	0,990
	E20	Polinómica 4	$y = 3E-05x^4 - 0,017x^3 + 3,422x^2 - 311,9x + 12543$	0,845
	E40	Polinómica 4	$y = 2E-05x^4 - 0,012x^3 + 2,489x^2 - 208,0x + 6740$	0,989
	E60	Polinómica 4	$y = -3E-05x^4 + 0,010x^3 - 1,362x^2 + 60,38x - 179,4$	0,508
	E85	Polinómica 4	$y = 9E-07x^4 - 0,0002x^3 + 0,027x^2 - 2,007x + 81,97$	0,523
	E100	Polinómica 4	$y = 2E-05x^4 - 0,005x^3 + 0,525x^2 - 23,61x + 440,5$	0,886
4320	E10	Potencial	$y = 45115x^{-1,06}$	0,996
	E15	Potencial	$y = 37501x^{-1,04}$	0,998
	E20	Polinómica 4	$y = -5E-05x^4 - 0,018x^3 + 6,424x^2 - 596,0x + 20896$	0,781
	E40	Polinómica 4	$y = 0,0007x^4 - 0,203x^3 + 22,09x^2 - 1064,x + 21762$	0,684
	E60	Potencial	$y = 36952x^{-0,81}$	0,853
	E85	Polinómica 4	$y = -0,0004x^4 + 0,089x^3 - 5,980x^2 + 114,7x + 1154$	0,523
	E100	Exponencial	$y = 4102,e^{-0,11x}$	0,115

En la tabla 11 se presentan las regresiones para BSCO, donde 9 R2 son muy buenos, 11 son buenos y solamente uno está marcado como alerta, el correspondiente a E100 a 4320 RPM, condición en la cual los datos presentan una gran dispersión y debido al hecho de que E100 presenta baja potencia máxima, el número de puntos donde se toman datos es menor que para otras mezclas, lo que dificulta más un ajuste a la curva. Esta regresión fue la única encontrada de tipo exponencial. Las demás condiciones presentan regresiones de tipo potencial o polinómica.

Tabla 12 - Tendencias BSNO_x. Fuente: Elaboración propia.

RPM	Mezcla	Tipo de tendencia	Ecuación	R ²
2700	E10	Polinómica 4	$y = -9E-08x^4 + 4E-05x^3 - 0,005x^2 + 0,240x + 15,67$	0,756
	E15	Polinómica 4	$y = 6E-09x^4 - 1E-05x^3 + 0,003x^2 - 0,529x + 38,13$	0,978
	E20	Polinómica 4	$y = -4E-08x^4 + 7E-06x^3 + 0,001x^2 - 0,474x + 36,81$	0,982
	E40	Polinómica 4	$y = 3E-08x^4 - 2E-05x^3 + 0,005x^2 - 0,511x + 31,12$	0,839
	E60	Polinómica 4	$y = 3E-10x^4 - 6E-06x^3 + 0,001x^2 - 0,149x + 9,624$	0,719
	E85	Polinómica 4	$y = 7E-06x^4 - 0,001x^3 + 0,167x^2 - 6,837x + 103,4$	0,756
	E100	Potencial	$y = 7,275x^{-0,25}$	0,529
3600	E10	Polinómica 4	$y = 2E-08x^4 - 1E-05x^3 + 0,002x^2 - 0,173x + 6,135$	0,988
	E15	Polinómica 4	$y = 3E-08x^4 - 2E-05x^3 + 0,002x^2 - 0,231x + 8,142$	0,969
	E20	Potencial	$y = 78,41x^{-0,90}$	0,740
	E40	Polinómica 4	$y = 5E-08x^4 - 3E-05x^3 + 0,005x^2 - 0,462x + 15,73$	0,964
	E60	Polinómica 4	$y = 1E-07x^4 - 5E-05x^3 + 0,009x^2 - 0,690x + 23,47$	0,918
	E85	Polinómica 4	$y = 4E-07x^4 - 0,0001x^3 + 0,015x^2 - 0,766x + 16,96$	0,911
	E100	Potencial	$y = 14,46x^{-0,74}$	0,645
4320	E10	Potencial	$y = 69,81x^{-0,86}$	0,977
	E15	Potencial	$y = 59,83x^{-0,80}$	0,976
	E20	Potencial	$y = 67,20x^{-0,74}$	0,377
	E40	Potencial	$y = 56,36x^{-0,59}$	0,250
	E60	Potencial	$y = 62,39x^{-0,68}$	0,793
	E85	Potencial	$y = 39,04x^{-0,51}$	0,658
	E100	Potencial	$y = 47,55x^{-0,61}$	0,212

En la tabla 12 se presentan las regresiones para BSNO_x a las diferentes velocidades de motor evaluadas. Aquí se observa en general un buen R² a 2700 y muy bueno a 3600; sin embargo a 4320 la dispersión de los datos aumenta mucho y la variación de los mismo presenta una baja repetitividad, lo que dificulta el ajuste a una curva; no obstante la nube de puntos sigue la misma tendencia para cada toma experimental, luego si se construyera una regresión para cada una de las 3 tomas experimentales, las curvas serían similares y sus coeficientes de correlación serían mayores. Estas regresiones no se descartan debido a que muestran un comportamiento coherente con el fenómeno estudiado, el cual puede depender de alguna variable no controlada, probablemente la temperatura de combustión, variable recurrente en la literatura al respecto.

Tabla 13 - Tendencias BSHC. Fuente: Elaboración propia.

RPM	Mezcla	Tipo de tendencia	Ecuación	R ²
2700	E10	Potencial	$y = 37,61x^{-0,73}$	0,936
	E15	Polinómica 4	$y = -2E-10x^4 - 3E-06x^3 + 0,001x^2 - 0,141x + 7,423$	0,924
	E20	Polinómica 4	$y = 3E-08x^4 - 2E-05x^3 + 0,003x^2 - 0,298x + 11,56$	0,935
	E40	Polinómica 4	$y = 4E-09x^4 - 3E-06x^3 + 0,0008x^2 - 0,096x + 5,476$	0,946
	E60	Potencial	$y = 109,6x^{-0,87}$	0,764
	E85	Potencial	$y = 115,4x^{-0,75}$	0,296
	E100	Potencial	$y = 43,23x^{-0,43}$	0,097
3600	E10	Polinómica 4	$y = 5E-08x^4 - 3E-05x^3 + 0,005x^2 - 0,492x + 18,98$	0,993
	E15	Polinómica 4	$y = 8E-08x^4 - 4E-05x^3 + 0,007x^2 - 0,599x + 20,47$	0,983
	E20	Potencial	$y = 974,6x^{-1,39}$	0,895
	E40	Polinómica 4	$y = 3E-08x^4 - 2E-05x^3 + 0,003x^2 - 0,325x + 11,17$	0,902
	E60	Polinómica 4	$y = 4E-08x^4 - 2E-05x^3 + 0,003x^2 - 0,253x + 7,862$	0,846
	E85	Polinómica 4	$y = 2E-07x^4 - 7E-05x^3 + 0,007x^2 - 0,387x + 7,789$	0,937
	E100	Polinómica 3	$y = -8E-06x^3 + 0,002x^2 - 0,185x + 6,533$	0,936
4320	E10	Polinómica 4	$y = 3E-06x^4 - 0,0006x^3 + 0,059x^2 - 2,577x + 51,49$	0,936
	E15	Polinómica 4	$y = 6E-07x^4 - 0,0002x^3 + 0,022x^2 - 1,271x + 33,48$	0,985
	E20	Potencial	$y = 270,5x^{-1,02}$	0,719
	E40	Polinómica 4	$y = 1E-06x^4 - 0,0003x^3 + 0,034x^2 - 1,633x + 32,49$	0,913
	E60	Polinómica 4	$y = 3E-07x^4 - 0,0001x^3 + 0,012x^2 - 0,664x + 18,08$	0,971
	E85	Potencial	$y = 46,95x^{-0,75}$	0,646
	E100	Potencial	$y = 802,7x^{-1,46}$	0,521

En la tabla 13 se presentan las regresiones para BSHC, donde se observan muy buenos R² para 3600 y buenos para 4320 RPM, en estas condiciones la dispersión de los datos es baja o moderada y presentan una repetitividad buena aunque menor a BSFC o BSCO₂ que presentan unas tendencias y repetitividades muy altas. Para 2700 RPM el BSHC cuenta con regresiones muy buenas en las mezclas E10, E15, E20 y E40, buena en E60, y alertas en E85 y E100, siendo éstas las mezclas que presentaron la menor potencia y por lo tanto la menor cantidad de puntos. Para estas dos mezclas la dispersión de los puntos es muy grande, especialmente en E100; no obstante nuevamente cada conjunto de datos de una misma toma presenta la misma tendencia decreciente por lo que no se descartan los datos.

6.6 MATRIZ DE SELECCIÓN

Se construye una matriz de toma de decisiones para evaluar las mezclas utilizando para ello 6 criterios: consumo específico de combustible, potencia al freno (BP) y las 4 emisiones específicas al freno. Se asignan puntuaciones a cada criterio teniendo en cuenta un 40% a la condición de 3600 RPM y 30% a cada una de las condiciones de 2700 y 4320 RPM, puesto que 3600 RPM es la velocidad ideal de operación para el MCI-EP utilizado, velocidad que se encuentra en el rango recomendado de operación en el manual del propietario [51] y que entrega la máxima potencia; este resultado se corroboró con el análisis de desempeño efectuado mediante la observación directa durante el procedimiento experimental y con los resultados de eficiencia térmica, mucho mayores para esta condición que para las otras dos. Se asignan pesos ponderados de 30% para consumo y potencia por ser los criterios en los que más se fijaría un usuario final y 40% a emisiones, distribuido en 10% a cada especie de emisión contaminante, como se muestra en la tabla 14.

Tabla 14 - Matriz de selección. Fuente: Elaboración Propia.

		Mezclas													
criterio	peso	E10		E15		E20		E40		E60		E85		E100	
		Punt.	peso	Punt.	peso	Punt.	peso	Punt.	peso	Punt.	peso	Punt.	peso	Punt.	peso
BSFC	0,3	9,9	2,97	9,7	2,92	10,0	3,00	9,7	2,91	9,7	2,91	8,8	2,65	7,7	2,30
BP	0,3	9,6	2,87	8,9	2,66	9,3	2,80	10,0	3,00	7,8	2,33	5,7	1,72	3,5	1,04
BSCO2	0,1	10,0	1,00	8,1	0,81	7,5	0,75	8,7	0,87	7,6	0,76	7,2	0,72	6,7	0,67
BSCO	0,1	0,2	0,02	0,2	0,02	0,3	0,03	0,6	0,06	1,3	0,13	3,2	0,32	10,0	1,00
BSNOx	0,1	4,1	0,41	3,4	0,34	3,3	0,33	3,3	0,33	4,9	0,49	7,3	0,73	10,0	1,00
BSHC	0,1	5,6	0,56	5,7	0,57	6,1	0,61	9,4	0,94	9,6	0,96	10,0	1,00	7,0	0,70
total		7.82		7.34		7.52		8.10		7.57		7.13		6.71	

Utilizando estos criterios se encuentra que la mayor puntuación corresponde a la mezcla E40 seguida por la mezcla E10 y la menor puntuación corresponde a la mezcla E100, como se muestra en el gráfico 21.

En el gráfico 22 se presenta la puntuación discriminada donde se especifica cuánto aporta cada criterio a la puntuación final para cada una de las mezclas evaluadas, cuyos valores se muestran en la tabla del mismo gráfico.

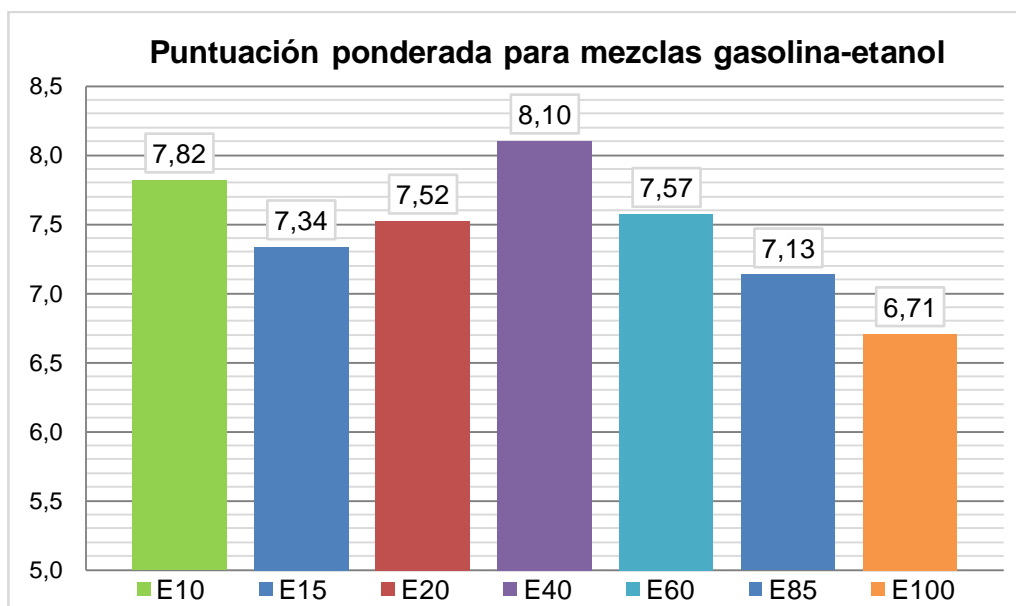


Gráfico 21 - Puntuación ponderada para mezclas gasolina etanol. Fuente: Elaboración propia.

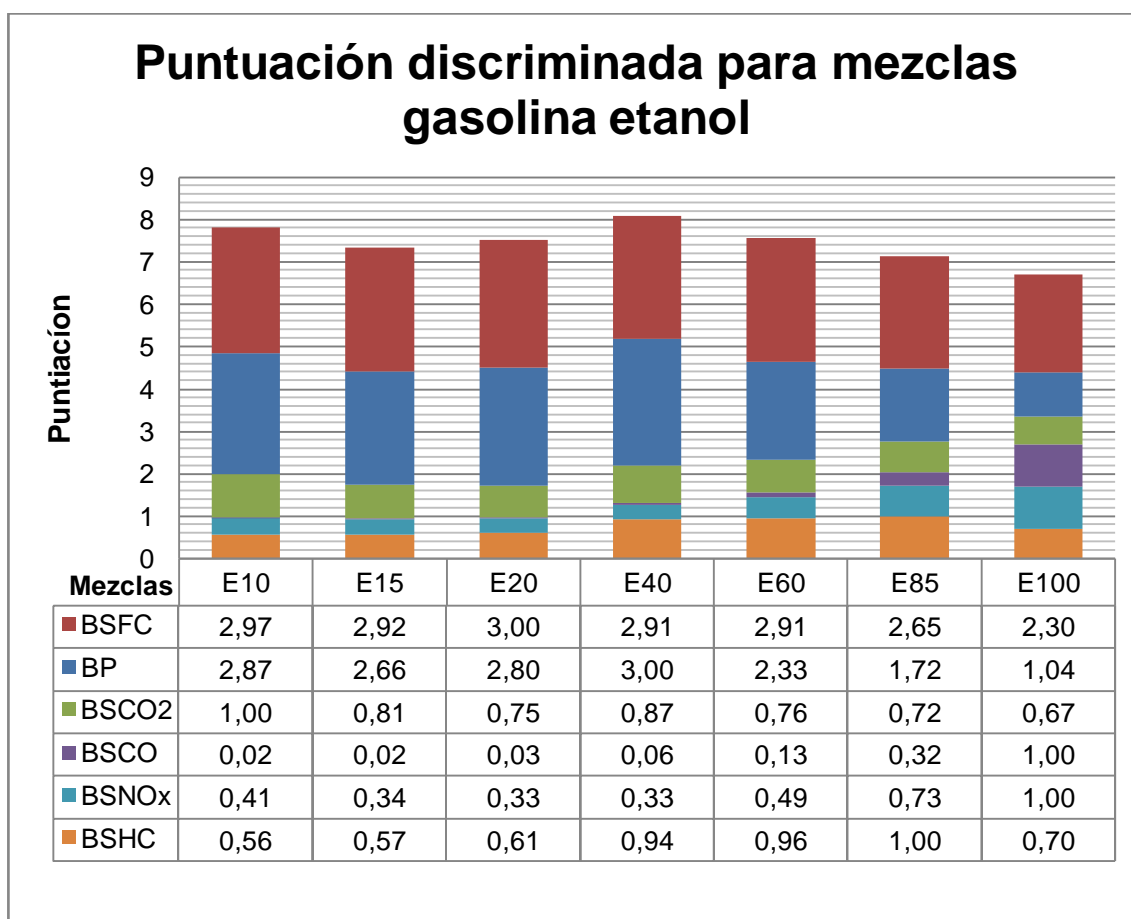


Gráfico 22 - Puntuación discriminada para mezclas gasolina etanol. Fuente: Elaboración propia.

CONCLUSIONES

De la matriz de selección realizada se concluye que la mezcla que mejor cumple los parámetros evaluados es E40, con una puntuación de 8.1 sobre 10 puntos posibles. Esta mezcla presenta la mayor potencia al freno y bajo consumo específico de combustible, con bajas emisiones específicas de CO₂ y HC; presentando NO_x y CO altos. Sin embargo este resultado no es definitivo, la mezcla E10 presenta una alta potencia al freno, un muy buen consumo específico de combustible y las menores emisiones de CO₂. El CO es menor que para E40; no obstante los NO_x y HC para esta mezcla son mayores que para E40. La selección de la mejor mezcla depende del valor ponderado que se le dé a cada criterio, por lo que las dos deben ser tenidas en cuenta. E15, E20 y E60 presentan buenas puntuaciones, pero no sobresalen. E85 y E100 debido a su baja potencia al freno y alto consumo específico de combustible salen calificadas muy por debajo de las demás; no obstante, se hace énfasis en que E100 fue la mezcla que presentó la mejor puntuación de emisiones específicas para CO y NO_x sin tener malas puntuaciones en CO₂ y HC.

Se encontró que de las mezclas evaluadas, las que producen la mayor potencia al freno son E20 y E40 a 3600 RPM; E40 y E60 a 4320 RPM y E10 a 2700 RPM, velocidad en la cual E40 presenta la segunda mayor potencia, con lo que se concluye que el contenido de etanol para una máxima potencia al freno estará cercano a 40%, comportamiento que indica que el oxígeno contenido en la mezcla compensa en alguna medida la pérdida de potencia por la altura sobre el nivel del mar, que se estima para este tipo de motores en el 30%. No obstante, la potencia medida en la mejor condición 1.58 kW se encuentra muy por debajo de la potencia nominal del motor que es 5.9 kW.

El consumo específico de combustible al freno depende del poder calorífico de la mezcla utilizada, con una diferencia pequeña entre las mezclas en la condición óptima de operación. La mezcla con menor poder calorífico, E100, presentó el mayor consumo específico en las 3 condiciones de operación evaluadas.

El método seguido para la presentación de tendencias entrega buenos resultados, validando el procedimiento realizado para la recolección de datos y haciendo esta investigación utilizable como referencia y punto de comparación para futuras investigaciones.

El menor BSCO₂ lo presentó E10; E15 presenta un aumento del 26.9%; E20 del 37.82%; E40 del 13.10%; E60 del 37.06%; E85 del 44.56% y E100 del 52.14%.

El mayor BSCO lo presenta E10 con reducciones del 13.99%; para E15, 27.63%; para E20, 40.79%; para E40, 74.95%; para E60, 84.87%; para E85 y 91.74% para E100.

El menor BSNO_x lo presenta E100 con 15.23%, menos que E10; E15 presenta un aumento respecto a E10 del 18.18%; E20 aumenta 44.46%; E60 98.76% y E85 presenta mayor emisión que E10, un 36.14%.

El menor BSHC lo presenta E40 con 30.65%, menos que E10, seguido de E60 que presenta 17.42%, menos que E10. Las mezclas E15, E20 y E85 presentan un aumento respecto a E10 de 6.31%, 8.41% y 9% respectivamente.

RECOMENDACIONES

Para darle continuidad y alcance a este proyecto se efectúan las siguientes recomendaciones:

- De la experiencia de trabajar con estas mezclas gasolina-etanol se concluye que los objetos de estudio deben centrarse entre 0 y 60% de etanol, pues estas mezclas presentan una buena potencia y estabilizan la operación del motor fácilmente; las mezclas con mayor contenido de etanol presentan más inconvenientes, entre los que se incluyen apagadas súbitas del motor.
- En futuras investigaciones podría ser conveniente obtener datos de más mezclas; se recomiendan inicialmente E30 y E50, adicional a las mezclas evaluadas en este trabajo.
- Para extender el alcance de esta investigación se recomienda realizar mediciones de emisiones no reguladas para las mismas mezclas y condiciones de carga.
- Se recomienda realizar un mayor número de tomas en futuras investigaciones para tener más datos disponibles y con ellos facilitar el manejo estadístico.
- Con el propósito de poder tener más datos para cada condición se recomienda un ajuste más fino para el banco de resistencias, pasarlo de los actuales 100 W a 50 W o 20 W.
- Con el fin de reducir variables no controladas, se recomienda que la transmisión de potencia se efectué con un sistema de engranaje.
- Se recomienda instalar un embrague y un motor de arranque eléctrico, para facilitar el encendido y la puesta en funcionamiento del sistema.
- Se recomienda realizar estudio de desgaste al motor.
- Disponer de un lugar de uso exclusivo para el banco de pruebas, ya que en funcionamiento genera mucho ruido, lo que resulta incómodo para las demás personas e interfiere con el desarrollo de otras actividades.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Ministerio de Minas y Energía, República de Colombia, "Resolución 180687 de 2003," Ministerio de Minas y Energía, República de Colombia, Resolución 2003.
- [2] ICONTEC, "CALIDAD DEL AIRE. EVALUACIÓN DE GASES DE ESCAPE DE FUENTES MÓVILES A GASOLINA. MÉTODO DE ENSAYO EN MARCHA MÍNIMA (RALENTÍ) Y VELOCIDAD CRUCERO Y ESPECIFICACIONES PARA LOS EQUIPOS EMPLEADOS EN ESTA EVALUACIÓN," Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación ICONTEC, Bogotá, Norma técnica NTC 4983, 2001.
- [3] Francisco Payri González and Jose María Desantes Fernandez, *Motores de combustión interna alternativos*. Barcelona, España: EDITORIAL REVERTÉ, S. A., 2011.
- [4] Clean Air Institute, "Metodologías para la estimación de emisiones de transporte urbano de carga y guías para la recopilación y organización de datos," Clean Air Institute, EE.UU., Washington D.C., 2013.
- [5] República de Colombia, Departamento Nacional de Planeación - DANE, "Bogotá,D.C.," Departamento Nacional de Planeación, Bogotá, Colombia, 2015.
- [6] Willard W Pulkrabek, *Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2004.
- [7] John B Heywood, *Internal combustion engine fundamentals*. New York: McGraw-Hill, 1988.
- [8] Stephen R Turns, *An introduction to combustion: concepts and applications*, second edition ed. Boston: McGraw-Hill, 2000.
- [9] Manuel Arias-Paz, *Manual de automóviles*, 55th ed. Madrid: CIE Dossat 2000, 2004.
- [10] Consejo Nacional de Energía, República de El Salvador, "Etanol," Consejo Nacional de Energía, República de El Salvador,.
- [11] Richard Stone, *Introduction to internal combustion engines*, 2nd ed. Basingstoke, England: Macmillan, 1992.
- [12] Wei-Dong Hsieh, Rong-Hong Chen, Tsung-Lin Wu, and Ta-Hui Lin, "Engine performance and pollutant emission of an SI engine," *Atmospheric Environment*, no. 36, pp. 403–410, 2002.
- [13] Costa, R. Sodré, J., "Hydrous ethanol vs. gasoline-ethanol blend: Engine performance and emissions," *Fuel*, vol. 89, pp. 287–293, 2010.
- [14] Yücesu, H. Topgül, T. Cinar, C. Okur, M., "Effect of ethanol–gasoline blends on engine performance and exhaust emissions in different compression ratios," *Applied Thermal Engineering*, vol. 26, pp. 2272–2278, 2006.
- [15] Celik, M., "Experimental determination of suitable ethanol–gasoline blend rate at high compression ratio for gasoline engine," *Applied Thermal Engineering*, vol. 28, pp. 396–404, 2008.
- [16] Turner, D. Xu, H. Cracknell, R. Natarajan, V. Chen, X., "Combustion performance of bio-ethanol at various blend ratios in a gasoline direct injection engine," *Fuel*, vol. 90, pp. 1999–

2006, 2011.

- [17] Wu, X. Daniel, R. Tian, G. Xu, H. Huang, Z. Richardson, D., "Dual-injection: The flexible, bi-fuel concept for spark-ignition engines fuelled with various gasoline and biofuel blends," *Applied Energy*, vol. 88, pp. 2305–2314, 2011.
- [18] Ozsezen, A. Canakci, M., "Performance and combustion characteristics of alcoholegasoline blends at wide-open throttle," *Energy*, vol. 36, pp. 2747-2752, 2011.
- [19] Zhuang, Y. Hong, G., "Primary investigation to leveraging effect of using ethanol fuel on reducing gasoline fuel consumption," *Fuel*, pp. 425–431, 2013.
- [20] Balki, M. Sayin, C. Canakci, M., "The effect of different alcohol fuels on the performance, emission and combustion characteristics of a gasoline engine," *Fuel*, vol. 115, pp. 901–906, 2014.
- [21] Topgöl, T. Yücesu, H. Cinar, C. Koca A., "The effects of ethanol–unleaded gasoline blends and ignition timing on engine performance and exhaust emissions," *Renewable Energy*, vol. 31, pp. 2534–2542, 2006.
- [22] Schifter, I. Diaz, L. Rodriguez, R. Gómez, J.P. Gonzalez, U., "Combustion and emissions behavior for ethanol–gasoline blends in a single cylinder engine," *Fuel*, vol. 90, pp. 3586–3592, 2011.
- [23] Zhang, Z. Wang, T. Jia, M. Wei, Q. Meng, X. Shu, G., "Combustion and particle number emissions of a direct injection spark ignition engine operating on ethanol/gasoline and n-butanol/gasoline blends with exhaust gas recirculation," *Fuel*, vol. 130, pp. 177–188, 2014.
- [24] Costagliola, M.A. De Simio, L. Iannaccone, S. Prati, M.V., "Combustion efficiency and engine out emissions of a S.I. engine fueled with alcohol/gasoline blends," *Applied Energy*, vol. 111, pp. 1162–1171, 2013.
- [25] Hakan, B., "Experimental and theoretical investigation of using gasoline–ethanol blends in spark-ignition engines," *Renewable Energy*, vol. 30, pp. 1733–1747, 2005.
- [26] Chen, L. Stone, R. Richardson, D., "A study of mixture preparation and PM emissions using a direct injection engine fuelled with stoichiometric gasoline/ethanol blends," *Fuel*, vol. 96, pp. 120–130, 2012.
- [27] He, B. Wang, J. Hao, J. Yan, X. Xiao, J., "A study on emission characteristics of an EFI engine with ethanol blended gasoline fuels," *Atmospheric Environment*, vol. 37, pp. 949–957, 2003.
- [28] Al-Hasan, M., "Effect of ethanol–unleaded gasoline blends on engine performance and exhaust emission," *Energy Conversion and Management*, vol. 44, pp. 1547–1561, 2003.
- [29] Gravalos, I. Moshou, D. Gialamas, T. Xyradakis, P. Kateris, D. Tsiropoulos, Z., "Emissions characteristics of spark ignition engine operating on lowerehigher molecular mass alcohol blended gasoline fuels," *Renewable Energy*, vol. 50, pp. 27-32, 2013.
- [30] Graham, L. Belisle, S. Baas, C., "Emissions from light duty gasoline vehicles operating on low blend ethanol gasoline and E85," *Atmospheric Environment*, vol. 42, pp. 4498–4516, 2008.
- [31] Tavares, R. Sthel, M. S. Campos, L. S. Rocha, M. V. Lima, G. R. da Silva, M.G. Vargas H.,

- "Evaluation of Pollutant Gases Emitted by Ethanol and Gasoline Powered Vehicles," *Procedia Environmental Sciences*, vol. 4, pp. 51–60, 2011.
- [32] Ghazikhani, M. Hatami, M. Safari, B. Ganji, D., "Experimental investigation of exhaust temperature and delivery ratio effect on emissions and performance of agasoline–ethanol two-stroke engine," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 2, pp. 82–90, 2014.
- [33] Canakci, M. Ozsezen, A. Alptekin, E. Eyidogan, M., "Impact of alcoholegasoline fuel blends on the exhaust emission of an SI engine," *Renewable Energy*, vol. 52, pp. 111-117, 2013.
- [34] Karavalakis, G. Durbin, T. Shrivastava, M. Zheng, Z. Villela, M. Jung, H., "Impacts of ethanol fuel level on emissions of regulated and unregulated pollutants from a fleet of gasoline light-duty vehicles," *Fuel*, vol. 93, pp. 549–558, 2012.
- [35] Pouloupoulos, S.G. Samaras, D.P. Philippopoulos, C.J., "Regulated and unregulated emissions from an internal combustion engine operating on ethanol-containing fuels," *Atmospheric Environment*, vol. 35, pp. 4399–4406, 2001.
- [36] Lee, H. Myung, Ch. Park, S., "Time-resolved particle emission and size distribution characteristics during dynamic engine operation conditions with ethanol-blended fuels," *Fuel*, vol. 88, pp. 1680–1686, 2009.
- [37] Oscar Edwin Piamba Tulcán and Oscar Fabian Arias Collazos, "DESEMPEÑO DE MOTOR UTILIZANDO COMO COMBUSTIBLE MEZCLA DE ETANOL ANHIDRO Y GASOLINA EN RELACIÓN DE 10% EN VOLUMEN E10," *CONGRESO IBEROAMERICANO DE INGENIERÍA MECÁNICA*, vol. 8, Octubre 2007.
- [38] Higuera, O., Trisancho, J., Flórez, L., "BIOCOMBUSTIBLES Y SU APLICACIÓN EN COLOMBIA," *Scientia et Technica*, vol. 34, pp. 171-175, 2007.
- [39] Torres, J., Molina, D., Pinto, C., Rueda, F, "estudio de la mezcla de gasolina con 10% de etanol anhidro. evaluación de propiedades fisicoquímicas," *Ciencia, tecnología y futuro*, vol. 2, no. 3, pp. 71-82, 2002.
- [40] Gaviria, L., Ospina, S., Quirama, L., "Estudio del comportamiento de vehículos de carburador e Inyección con Mezclas Etanol Gasolina E12-E15," *Universidad Tecnológica de Pereira*, 2010.
- [41] M Olmo R Nave. relative humidity. [Online]. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/Kinetic/relhum.html>
- [42] Barani Design. (2012) Air Density Calculator. [Online]. <http://barani.biz/apps/air-density/>
- [43] Isidoro Martínez, *TERMODINAMICA BASICA Y APLICADA*. MADRID: DOSSAT SA, 1992. [Online]. <http://webserver.dmt.upm.es/~isidoro/bk3/c08/Termodinamica%20del%20aire%20humedo.pdf>
- [44] Richard Shelquist. (2016, Jan) An Introduction to Air Density. [Online]. http://wahiduddin.net/calc/density_altitude.htm
- [45] Antonio Guilherme Garcia Lima. Poder Calorífico. [Online]. <http://www.antoniolima.web.br.com/arquivos/podercalorifico.htm>
- [46] biblioteca.uns.edu.pe. Tablas Tema 3: Combustibles. [Online].

http://biblioteca.uns.edu.pe/saladocentes/archivos/curzoz/tablas_tema_3.pdf

- [47] Elton F. Morales Blancas. Tablas poder calorifico combustibles. [Online].
<http://www.icytal.uach.cl/efmb/apuntes/ITCL286/Teor%C3%ADa/Unidad%20-%20Vapor%20y%20Calderas/Tablas%20Poder%20Calorifico%20Combustibles.pdf>
- [48] Jim Frost. (2014, January) The Minitab Blog - How High Should R-squared Be in Regression Analysis? [Online]. <http://blog.minitab.com/blog/adventures-in-statistics/how-high-should-r-squared-be-in-regression-analysis>
- [49] SÉBASTIEN LOZANO FORERO, Coordinador Consultorio Estadístico, 2016.
- [50] Ciro Martínez Bencardino, *Estadística y muestreo*, 13th ed. Bogotá: Ecoe, 2012.
- [51] HONDA MOTOR CO., "Owner's Manual GX240 GX340," HONDA MOTOR CO.,.

ANEXO A: Formatos de recolección de datos

(Fuente: Elaboración propia)

EVALUACIÓN DE LAS EMISIONES REGULADAS DE UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA ENCENDIDO POR CHISPA,
OPERANDO CON MEZCLAS GASOLINA-ETANOL ANHIDRO EN LA CIUDAD DE BOGOTÁ.

Responsable: _____

Prueba # _____

Condiciones

Mezcla: _____

Velocidad: _____

	carga	corriente (A)	voltaje (V)	potencia (W)
toma 1	100%			
Fecha:	75%			
Hora:	50%			
	25%			

toma 2	100%			
Fecha:	75%			
Hora:	50%			
	25%			

toma 3	100%			
Fecha:	75%			
Hora:	50%			
	25%			

Observaciones: _____

EVALUACIÓN DE LAS EMISIONES REGULADAS DE UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA ENCENDIDO POR CHISPA,
OPERANDO CON MEZCLAS GASOLINA-ETANOL ANHIDRO EN LA CIUDAD DE BOGOTÁ.

Responsable: _____
Prueba # _____

Condiciones
Mezcla: _____
Velocidad: _____

	carga	Temp. Amb. (°C)	humeda d (%)	masa inicial (g)	masa final (g)	Tiempo (s)
toma 1						
Fecha:						
Hora:						

toma 2						
Fecha:						
Hora:						

toma 3						
Fecha:						
Hora:						

Observaciones: _____

EVALUACIÓN DE LAS EMISIONES REGULADAS DE UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA ENCENDIDO POR CHISPA,
OPERANDO CON MEZCLAS GASOLINA-ETANOL ANHIDRO EN LA CIUDAD DE BOGOTÁ.

Responsable: _____
Prueba # _____

Condiciones
Mezcla: _____
Velocidad: _____

	carga	RPM	Temp. gases (°C)	Vel. aire (m/s)	CO (%)	CO2 (%)	HC (PPM)	O2 (%)	NOx (PPM)
toma 1									
Fecha:									
Hora:									

toma 2									
Fecha:									
Hora:									

toma 3									
Fecha:									
Hora:									

Observaciones: _____

ANEXO B: Parámetros constantes

(Fuente: Elaboración propia)

Parámetros constantes utilizados en los cálculos		
Parámetro	Unidades	Valor
P_{atm}	kPa	75,415
$LHV_{gasolina}$	kJ/kg	43950
LHV_{etanol}	kJ/kg	26790
$e_{generador}$		0,756
V_d	m^3	0,0002428
$A_{entrada\ de\ aire}$	m^2	0,0008577
$C_{gasolina}$	moles	8
$H_{gasolina}$	moles	18
M_{etanol}	kg/kmol	46,06844
$M_{gasolina}$	kg/kmol	114,22852
M_{aire}	kg/kmol	28,850334
M_O	kg/kmol	15,9994
M_N	kg/kmol	14,0067
M_H	kg/kmol	1,00794
M_C	kg/kmol	12,0107
M_{CO2}	kg/kmol	44,0095
M_{CO}	kg/kmol	28,0101
M_{NO}	kg/kmol	30,0061
M_{NO2}	kg/kmol	46,0055
M_{HC}	kg/kmol	13,01864
M_{H2O}	kg/kmol	18,01528
M_{AIR}	kg/kmol	28,850334

ANEXO C: Resumen de resultados

(Fuente: Elaboración propia)

		PARÁMETROS DE ENTRADA			DESEMPEÑO			EMISIONES			
#	toma	BMEP	Mezcla	Velocidad	Potencia	BSFC	η_{th}	BSCO ₂	BSCO	BSNO _x	BSHC
		kPa	E%	RPM	kW	g/kWh		g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh
1	1	48,33	100	4300	0,420	4485,7	0,0300	14816,165	0,006	2,373	6,679
1	2	48,54	100	4300	0,422	4846,1	0,0277	10472,245	394,730	4,012	2,376
1	3	48,54	100	4300	0,422	5004,4	0,0269	9595,724	531,331	4,983	2,044
1	1	34,67	100	4300	0,302	6333,7	0,0212	19715,886	48,263	7,875	4,083
1	2	35,28	100	4300	0,307	6694,8	0,0201	13697,978	410,759	7,113	3,039
1	3	34,82	100	4300	0,303	6864,5	0,0196	15030,857	496,039	6,649	3,541
1	1	20,89	100	4300	0,182	10537,5	0,0128	26943,796	169,940	4,034	15,869
1	2	24,91	100	4300	0,217	16453,4	0,0122	21059,235	117,116	6,653	8,467
1	3	24,38	100	4300	0,212	9619,8	0,0140	22055,831	319,035	9,301	4,567
2	1	97,08	85	4300	0,844	2423,8	0,0515	5400,362	644,864	3,347	1,613
2	2	98,81	85	4300	0,860	2241,6	0,0547	5842,546	123,951	3,809	0,907
2	3	98,65	85	4250	0,848	2368,3	0,0545	5104,448	515,428	3,228	1,670
2	3	83,21	85	4300	0,724	2751,5	0,0455	6113,133	525,061	3,534	1,650
2	1	66,16	85	4300	0,576	3254,1	0,0377	7970,624	995,801	5,212	1,834
2	2	65,87	85	4300	0,573	3315,3	0,0370	8674,166	82,327	5,795	2,003
2	3	69,34	85	4300	0,603	3199,4	0,0383	7376,888	541,050	4,427	2,328
2	1	48,97	85	4300	0,426	4327,9	0,0300	9264,203	136,067	4,872	2,767
2	2	48,54	85	4300	0,422	4469,9	0,0274	11999,703	95,466	8,011	1,902
2	3	48,75	85	4300	0,424	4675,9	0,0281	9901,677	1098,167	4,548	3,451
2	1	34,81	85	4320	0,304	5724,0	0,0214	13378,296	382,292	4,820	4,482
2	2	34,82	85	4300	0,303	6187,5	0,0198	14303,635	1413,230	7,074	3,224
2	3	34,82	85	4300	0,303	6175,9	0,0199	14299,453	1572,789	6,152	5,667
2	1	24,38	85	4300	0,212	7611,6	0,0161	18941,373	973,276	5,655	3,239
2	2	24,48	85	4300	0,213	8682,3	0,0156	17780,977	1593,591	8,542	4,294
2	3	24,48	85	4300	0,213	8609,3	0,0152	18310,605	2015,152	8,452	2,708
3	1	114,92	60	4300	1,000	1924,6	0,0605	4670,598	790,831	2,532	1,799
3	2	114,41	60	4300	0,995	1894,4	0,0659	4288,303	849,430	2,454	1,566
3	3	114,41	60	4300	0,995	1942,4	0,0658	4293,283	876,559	2,060	1,471
3	1	83,58	60	4300	0,727	2477,3	0,0520	5434,422	774,897	3,003	1,700
3	2	83,58	60	4300	0,727	2492,9	0,0509	5549,771	1067,251	3,223	2,842
3	3	83,21	60	4300	0,724	2444,6	0,0485	5829,203	921,886	3,424	2,386
3	1	69,65	60	4300	0,606	3001,6	0,0445	6350,459	1364,103	2,611	2,289
3	2	69,65	60	4300	0,606	2911,6	0,0423	6677,795	1208,628	3,082	3,519
3	3	69,95	60	4300	0,608	2855,6	0,0388	7279,085	1080,990	4,150	2,554
3	1	52,23	60	4300	0,454	3786,3	0,0331	8533,123	1831,503	3,268	3,759

3	2	52,23	60	4300	0,454	3734,6	0,0314	8982,951	1366,122	4,321	4,364
3	3	52,23	60	4300	0,454	3684,2	0,0320	8820,630	1167,255	4,837	3,823
3	1	38,47	60	4300	0,335	5039,3	0,0250	11298,186	2443,324	4,122	4,923
3	2	38,31	60	4300	0,333	4867,5	0,0256	11023,509	1644,605	5,416	5,084
3	3	38,31	60	4300	0,333	4845,7	0,0233	12102,599	1461,954	6,755	5,261
3	1	26,23	60	4300	0,228	7181,3	0,0196	14416,752	3562,301	4,580	7,125
3	2	24,48	60	4300	0,213	7405,8	0,0165	17075,547	2758,757	7,535	7,938
3	3	24,38	60	4300	0,212	7440,0	0,0166	17007,429	2381,385	8,429	7,467
4	1	114,41	40	4300	0,995	1555,4	0,0624	5237,532	554,687	6,643	3,359
4	2	114,92	40	4300	1,000	1931,3	0,0670	4106,026	2204,628	1,996	2,610
4	3	114,41	40	4300	0,995	1836,8	0,0567	4853,872	1561,800	2,085	2,047
4	1	83,21	40	4300	0,724	2254,7	0,0431	7643,762	611,915	10,130	2,367
4	2	83,58	40	4300	0,727	2459,3	0,0495	5554,925	2664,623	2,632	2,525
4	3	83,21	40	4300	0,724	2301,1	0,0422	6600,716	1964,386	3,301	2,622
4	1	69,34	40	4300	0,603	2580,7	0,0376	9051,615	739,398	11,498	2,635
4	2	69,65	40	4300	0,606	2987,4	0,0445	6180,658	3496,145	2,693	4,355
4	3	69,65	40	4300	0,606	2757,7	0,0368	7478,036	2238,699	3,356	2,909
4	1	48,97	40	4300	0,426	3544,3	0,0274	11158,006	1448,722	11,248	2,693
4	2	48,75	40	4300	0,424	3969,9	0,0269	10239,376	3387,563	3,612	3,972
4	3	52,23	40	4300	0,454	3558,5	0,0295	9312,816	2841,730	3,676	3,759
4	1	34,98	40	4300	0,304	5000,1	0,0194	14823,545	2240,701	13,000	4,312
4	2	34,98	40	4300	0,304	5434,6	0,0206	13360,758	4730,605	4,670	5,948
4	3	38,47	40	4300	0,335	4717,4	0,0209	13168,149	4435,575	4,645	5,953
4	1	24,48	40	4300	0,213	7071,0	0,0140	19669,859	3949,959	13,619	7,925
4	2	24,48	40	4300	0,213	7796,0	0,0147	18701,804	7522,614	6,086	8,962
4	3	24,48	40	4300	0,213	7445,7	0,0142	19308,450	7206,350	6,360	9,649
5	1	114,41	20	4300	0,995	1446,1	0,0614	5232,196	836,576	5,684	1,170
5	2	100,99	20	4300	0,878	1947,9	0,0587	4500,438	2425,340	1,592	2,518
5	3	100,99	20	4300	0,878	1963,5	0,0596	4434,760	2431,717	1,586	2,508
5	4	100,99	20	4300	0,878	1972,8	0,0578	4573,567	2580,974	1,548	2,661
5	1	83,21	20	4300	0,724	1973,4	0,0450	6986,680	1386,328	6,057	1,789
5	2	83,58	20	4300	0,727	2371,0	0,0491	5378,387	3171,290	1,755	8,430
5	3	83,94	20	4300	0,730	2309,2	0,0485	5454,130	3167,572	1,845	3,025
5	4	83,58	20	4300	0,727	2315,8	0,0490	5398,617	3154,855	1,826	3,103
5	1	69,65	20	4300	0,606	2351,3	0,0378	7964,596	1891,000	6,234	2,643
5	2	69,65	20	4300	0,606	2851,4	0,0427	6187,908	3713,937	2,092	3,682
5	3	69,65	20	4300	0,606	2780,3	0,0409	6455,959	3932,152	2,131	3,931
5	4	69,65	20	4300	0,606	2755,5	0,0427	6191,902	3623,790	2,070	3,642
5	1	52,01	20	4300	0,452	3122,9	0,0285	10452,991	2532,758	7,047	3,662
5	2	52,23	20	4300	0,454	3639,8	0,0316	8368,702	5029,026	2,560	5,239
5	3	52,46	20	4300	0,456	3606,8	0,0318	8308,475	5072,769	2,609	4,944
5	4	52,46	20	4300	0,456	3589,7	0,0315	8379,698	5207,817	2,662	5,220
5	1	38,31	20	4300	0,333	4305,9	0,0206	13782,469	3614,361	7,952	4,794

5	2	38,47	20	4300	0,335	4871,7	0,0227	11654,834	7150,401	3,566	7,817
5	3	38,47	20	4300	0,335	4925,3	0,0224	11783,375	7264,145	3,415	7,215
5	4	38,47	20	4300	0,335	4874,1	0,0239	11054,448	6817,897	3,280	7,358
5	1	24,48	20	4300	0,213	6748,8	0,0132	21205,072	5350,662	12,603	6,606
5	2	24,48	20	4300	0,213	7540,8	0,0143	18476,111	11143,919	5,504	10,804
5	3	24,48	20	4300	0,213	7540,4	0,0143	18490,520	11463,805	5,422	12,420
5	4	24,48	20	4300	0,213	7375,1	0,0148	17865,301	11685,559	5,216	10,824
6	1	100,89	15	4304	0,878	1959,8	0,0568	4600,717	2975,272	1,428	2,425
6	2	101,90	15	4280	0,882	1966,4	0,0562	4652,042	3132,047	1,552	2,835
6	3	101,45	15	4299	0,882	1952,3	0,0588	4441,910	2954,971	1,464	2,737
6	1	83,34	15	4312	0,727	2384,8	0,0464	5633,179	3829,911	1,698	3,450
6	2	87,03	15	4320	0,761	2318,2	0,0508	5145,249	3622,410	1,671	3,683
6	3	83,71	15	4312	0,730	2342,8	0,0512	5102,186	3665,407	1,590	3,490
6	1	69,65	15	4300	0,606	2800,9	0,0416	6288,952	4412,666	1,912	3,880
6	2	69,78	15	4292	0,606	2808,2	0,0425	6143,792	4491,902	1,967	4,657
6	3	69,95	15	4300	0,608	2792,2	0,0419	6245,976	4506,982	1,946	4,596
6	1	52,22	15	4301	0,454	3717,9	0,0306	8534,146	6225,979	2,585	6,027
6	2	52,11	15	4310	0,454	3737,3	0,0339	7710,727	6099,367	2,219	6,102
6	3	52,37	15	4308	0,456	3653,4	0,0320	8164,754	6104,249	2,433	6,787
6	1	38,32	15	4298	0,333	5052,4	0,0225	11606,754	8439,860	3,315	7,768
6	2	38,43	15	4305	0,335	4958,0	0,0247	10597,101	8356,279	2,763	8,142
6	3	38,42	15	4306	0,335	4920,8	0,0246	10608,515	8110,877	3,108	9,535
6	1	24,50	15	4297	0,213	7754,3	0,0148	17653,915	13241,337	5,106	13,023
6	2	24,43	15	4309	0,213	7997,5	0,0157	16633,034	13678,472	4,243	13,207
6	3	24,50	15	4297	0,213	7664,6	0,0154	17025,284	13284,459	4,746	13,932
7	1	83,34	10	4312	0,727	2367,1	0,0484	5341,738	4062,522	1,639	3,800
7	2	83,34	10	4312	0,727	2405,3	0,0489	5284,470	4143,797	1,595	3,908
7	3	83,58	10	4300	0,727	2380,0	0,0532	4856,102	3951,968	1,390	6,321
7	1	69,71	10	4296	0,606	2815,0	0,0403	6409,261	4874,399	1,854	4,728
7	2	69,71	10	4296	0,606	2835,7	0,0415	6228,789	5096,275	1,816	4,728
7	3	69,47	10	4311	0,606	2827,8	0,0448	5771,424	4765,305	1,674	7,383
7	1	52,23	10	4300	0,454	3704,3	0,0310	8336,588	6848,760	2,278	6,847
7	2	52,23	10	4300	0,454	3757,3	0,0313	8262,942	6878,768	2,288	6,420
7	3	52,17	10	4305	0,454	3774,0	0,0336	7692,012	6364,313	2,015	8,025
7	1	34,90	10	4290	0,303	5516,1	0,0207	12491,862	10484,083	3,344	10,495
7	2	38,39	10	4290	0,333	5009,7	0,0235	11018,205	9495,440	2,887	9,205
7	3	38,19	10	4313	0,333	5131,1	0,0233	11093,365	9187,981	2,867	10,764
7	1	27,97	10	4302	0,243	6741,9	0,0174	14865,087	12475,866	3,705	12,430
7	2	24,47	10	4302	0,213	7740,1	0,0149	17398,108	15350,690	4,455	15,017
7	3	24,32	10	4310	0,212	8035,1	0,0149	17299,648	14923,638	4,694	16,597
8	1	82,57	100	3627	0,606	2479,0	0,0542	5794,275	9,537	0,657	0,916
8	2	82,64	100	3624	0,606	2533,0	0,0531	6312,172	10,214	0,556	0,728
8	3	82,32	100	3654	0,608	2555,3	0,0528	4865,665	21,543	0,439	0,701

8	1	61,59	100	3647	0,454	3210,9	0,0419	8255,138	13,588	0,936	1,137
8	2	62,48	100	3595	0,454	3321,8	0,0431	5961,050	13,312	0,507	0,773
8	3	62,27	100	3623	0,456	3281,4	0,0410	7266,701	20,285	0,574	1,263
8	1	40,71	100	3678	0,303	2994,6	0,0449	13383,878	21,842	1,346	1,895
8	2	41,97	100	3568	0,303	4939,4	0,0272	11326,388	57,415	0,833	1,690
8	3	41,24	100	3631	0,303	4866,0	0,0276	11262,263	38,060	0,759	1,916
8	1	29,21	100	3589	0,212	8065,6	0,0167	16694,114	70,834	1,445	2,263
8	2	28,79	100	3641	0,212	6810,9	0,0197	17462,141	78,682	1,070	3,017
8	3	29,74	100	3555	0,214	6770,4	0,0198	15293,485	86,907	0,945	2,747
9	1	117,65	85	3675	0,875	1767,8	0,1190	2334,885	9,288	0,859	0,297
9	2	118,68	85	3643	0,875	1701,2	0,0942	2950,428	6,107	1,345	0,092
9	3	116,88	85	3699	0,875	1712,4	0,0725	3835,912	3,938	1,821	0,256
9	1	98,06	85	3649	0,724	1990,8	0,0653	4256,587	6,608	1,486	0,440
9	2	98,98	85	3615	0,724	2031,4	0,0865	3213,721	5,030	1,240	0,288
9	3	100,38	85	3580	0,727	2036,5	0,0840	3309,829	6,795	1,608	0,300
9	1	82,29	85	3655	0,608	2152,4	0,0570	6117,592	9,420	2,084	0,788
9	2	81,92	85	3640	0,603	2399,2	0,0608	4574,703	7,101	1,597	0,440
9	3	82,59	85	3626	0,606	2413,6	0,0586	4739,395	7,357	2,054	0,479
9	1	61,25	85	3667	0,454	3031,3	0,0404	7454,298	31,110	2,369	0,813
9	2	60,67	85	3686	0,452	3104,7	0,0395	7857,644	12,399	2,698	0,768
9	3	61,59	85	3647	0,454	3158,7	0,0470	5916,846	18,520	2,351	0,603
9	1	40,69	85	3664	0,302	4381,1	0,0280	11442,402	58,261	3,993	1,164
9	2	41,33	85	3623	0,303	4622,8	0,0318	8732,308	22,966	2,748	0,918
9	3	41,31	85	3625	0,303	4635,4	0,0404	6880,067	10,594	2,382	0,673
9	1	28,76	85	3660	0,213	6164,6	0,0199	16256,625	73,904	4,734	1,565
9	2	28,64	85	3660	0,212	6290,4	0,0195	16697,174	26,132	4,643	1,700
9	3	29,02	85	3628	0,213	6682,7	0,0183	15907,171	24,693	4,477	1,645
10	1	176,94	60	3639	1,303	1171,0	0,2077	1360,010	54,261	1,694	0,282
10	2	170,62	60	3670	1,267	1292,1	0,1585	1782,356	400,948	0,947	0,459
10	3	173,31	60	3699	1,297	1187,9	0,1859	1519,368	46,949	1,807	0,234
10	1	135,12	60	3641	0,995	1445,5	0,0906	3116,842	176,167	3,430	0,406
10	2	134,13	60	3700	1,004	1434,1	0,1097	2575,729	60,270	2,360	0,263
10	3	134,79	60	3650	0,995	1459,1	0,1028	2747,726	139,643	3,123	0,376
10	1	99,14	60	3609	0,724	1898,9	0,0640	4413,845	302,204	4,214	0,762
10	2	98,65	60	3627	0,724	1850,1	0,1045	2701,814	53,498	2,453	0,284
10	3	99,50	60	3596	0,724	1870,1	0,1080	2615,490	43,157	2,401	0,281
10	1	82,46	60	3632	0,606	2254,8	0,0569	4966,932	337,677	4,012	1,113
10	2	78,46	60	3626	0,576	2324,1	0,0580	4871,670	139,071	4,092	0,530
10	3	78,21	60	3622	0,573	2338,6	0,0626	4511,096	295,682	4,009	0,508
10	1	62,53	60	3592	0,454	2743,0	0,0396	7141,752	511,359	4,636	1,304
10	2	58,44	60	3587	0,424	3034,9	0,0396	7126,230	132,004	5,560	0,739
10	3	57,63	60	3622	0,422	3112,4	0,0368	7685,269	229,966	6,274	1,001
10	1	45,83	60	3594	0,333	3686,3	0,0303	9312,967	807,418	5,585	1,931

10	2	41,29	60	3611	0,302	4355,7	0,0270	10474,159	1179,429	5,578	1,986
10	3	41,61	60	3583	0,302	4223,2	0,0293	9624,357	261,234	7,399	1,193
10	1	29,28	60	3596	0,213	5588,2	0,0194	14542,344	1018,111	8,287	2,680
10	2	24,88	60	3611	0,182	6864,5	0,0175	16122,331	397,719	10,903	4,473
10	3	25,00	60	3594	0,182	6865,8	0,0164	17250,676	528,633	12,917	2,381
11	1	214,09	40	3637	1,575	939,3	0,2297	1197,593	202,092	1,605	2,230
11	2	214,27	40	3634	1,575	937,3	0,1842	1493,866	185,555	1,918	0,410
11	3	215,33	40	3616	1,575	946,7	0,1764	1559,300	203,366	2,071	0,435
11	1	152,04	40	3628	1,116	1268,2	0,1547	1778,592	314,006	1,638	1,871
11	2	153,65	40	3590	1,116	1250,0	0,2262	1216,034	171,919	1,201	0,516
11	3	157,88	40	3604	1,151	1233,1	0,1194	2303,567	328,362	2,359	0,687
11	1	116,34	40	3588	0,844	1617,2	0,1397	1969,409	394,245	1,515	0,817
11	2	117,21	40	3577	0,848	1569,5	0,1475	1864,996	332,960	1,488	0,692
11	3	120,49	40	3604	0,878	1572,4	0,1455	1890,293	285,733	1,592	0,713
11	1	78,42	40	3628	0,576	2287,4	0,0807	3407,038	703,788	2,152	1,715
11	2	78,61	40	3619	0,576	2274,6	0,1529	1799,014	358,304	1,203	0,674
11	3	82,82	40	3616	0,606	2196,8	0,1005	2738,302	545,575	1,748	1,085
11	1	58,41	40	3589	0,424	3070,9	0,0858	3205,242	681,181	1,949	1,377
11	2	58,04	40	3612	0,424	3038,9	0,0677	4066,118	829,914	2,354	1,514
11	3	58,50	40	3599	0,426	2977,1	0,0702	3918,789	785,434	2,380	1,535
11	1	37,57	40	3603	0,274	4645,9	0,0370	7427,378	1629,639	4,060	3,334
11	2	41,47	40	3611	0,303	4125,3	0,0367	7505,455	1616,465	4,176	2,676
11	3	41,68	40	3608	0,304	4182,7	0,0357	7700,010	1551,893	4,349	2,737
11	1	25,03	40	3605	0,183	6781,1	0,0210	13079,687	2865,740	6,652	5,444
11	2	24,95	40	3616	0,183	6719,0	0,0196	14063,162	3046,338	7,004	5,510
11	3	25,00	40	3610	0,183	6716,4	0,0191	14433,093	2889,280	7,943	4,452
12	1	209,98	20	3692	1,568	964,2	0,3010	878,071	321,205	0,502	0,403
12	2	215,48	20	3582	1,561	991,7	0,2444	1081,391	396,249	0,611	0,506
12	3	215,93	20	3606	1,575	956,5	0,2498	1058,298	389,608	0,690	0,482
12	1	151,92	20	3631	1,116	1270,1	0,2130	1240,763	526,732	0,549	0,617
12	2	152,89	20	3592	1,111	1331,6	0,1266	2088,643	910,519	1,057	1,056
12	3	152,42	20	3619	1,116	1287,0	0,1342	1969,604	854,234	0,956	0,931
12	1	116,12	20	3595	0,844	1664,1	0,1243	2126,954	1068,255	0,768	1,306
12	2	114,56	20	3628	0,841	1689,4	0,0777	3403,378	1632,727	1,394	2,133
12	3	120,33	20	3593	0,875	1573,0	0,0906	2917,565	1294,028	1,241	1,501
12	1	78,68	20	3616	0,576	2339,3	0,1359	1945,150	987,710	0,659	1,107
12	2	78,31	20	3617	0,573	2424,8	0,0503	5251,228	2772,903	1,798	3,038
12	3	78,10	20	3627	0,573	2337,3	0,0542	4874,300	2244,200	2,046	2,761
12	1	57,48	20	3631	0,422	3170,2	0,0633	4174,632	2207,328	1,302	2,999
12	2	57,40	20	3636	0,422	3215,8	0,0373	7085,846	3886,559	2,425	4,710
12	3	57,94	20	3618	0,424	3037,2	0,0377	7019,073	3384,488	2,641	4,559
12	1	41,04	20	3633	0,302	4297,7	0,0533	4962,760	2662,230	1,397	3,598
12	2	41,53	20	3590	0,302	4339,3	0,0284	9319,701	5223,833	3,006	7,143

12	3	41,34	20	3622	0,303	4217,8	0,0254	10392,116	4784,684	3,904	6,966
12	1	25,01	20	3592	0,182	7127,6	0,0334	7924,397	4245,432	2,171	5,203
12	2	24,88	20	3595	0,181	6822,6	0,0150	17584,599	7775,983	6,468	13,763
12	3	25,01	20	3593	0,182	6735,0	0,0161	16390,733	8036,061	6,111	11,562
13	1	189,06	15	3690	1,411	1089,3	0,2057	1270,802	586,591	0,533	0,646
13	2	190,62	15	3692	1,424	1066,3	0,2327	1123,496	526,130	0,508	0,553
13	3	193,46	15	3699	1,448	1040,2	0,1821	1435,280	699,020	0,583	0,872
13	1	152,55	15	3616	1,116	1331,8	0,1448	1805,512	968,551	0,646	1,109
13	2	153,34	15	3613	1,121	1309,5	0,1281	2040,349	1092,260	0,753	1,133
13	3	157,24	15	3603	1,146	1287,8	0,1609	1624,898	830,750	0,593	0,961
13	1	99,47	15	3597	0,724	1963,2	0,0820	3187,407	1940,036	0,939	2,146
13	2	99,42	15	3599	0,724	1937,2	0,0885	2953,838	1691,989	0,953	1,758
13	3	99,83	15	3600	0,727	1943,3	0,0936	2794,100	1645,981	0,855	1,788
13	1	78,68	15	3600	0,573	2480,7	0,0642	4068,496	2496,078	1,146	2,813
13	2	82,66	15	3607	0,603	2328,1	0,0696	3757,289	2163,083	1,182	2,236
13	3	82,91	15	3612	0,606	2306,1	0,0685	3815,492	2270,264	1,106	2,362
13	1	57,88	15	3606	0,422	3248,7	0,0442	5918,551	3775,759	1,591	4,017
13	2	57,74	15	3615	0,422	3214,8	0,0423	6179,258	3607,349	1,918	3,614
13	3	58,23	15	3600	0,424	3202,0	0,0420	6219,956	4058,888	1,920	4,190
13	1	41,41	15	3616	0,303	4467,9	0,0327	7997,371	5095,961	2,150	5,483
13	2	41,68	15	3593	0,303	4333,1	0,0337	7749,074	4815,897	2,083	4,827
13	3	41,59	15	3600	0,303	4367,0	0,0324	8078,541	5038,801	2,237	5,398
13	1	24,82	15	3620	0,182	7305,7	0,0180	14541,117	8906,363	3,909	9,413
13	2	24,97	15	3598	0,182	6968,8	0,0167	15696,902	9467,631	4,423	10,529
13	3	25,07	15	3600	0,183	7160,0	0,0190	13746,483	9250,497	3,598	9,025
14	1	190,93	10	3670	1,417	1301,4	0,1912	1351,579	688,176	0,483	0,610
14	2	193,88	10	3691	1,448	1058,2	0,2103	1229,132	669,197	0,426	0,684
14	3	194,30	10	3683	1,448	1033,0	0,2847	907,928	505,303	0,342	0,570
14	1	157,37	10	3600	1,146	1288,9	0,2376	1087,598	605,297	0,351	0,554
14	2	156,50	10	3620	1,146	1303,0	0,2013	1284,144	781,603	0,399	0,738
14	3	156,63	10	3617	1,146	1277,7	0,1539	1679,053	1019,510	0,534	1,039
14	1	98,57	10	3630	0,724	1965,2	0,0871	2966,066	1874,600	0,836	1,775
14	2	99,01	10	3614	0,724	1973,1	0,0862	2999,590	2104,673	0,937	2,078
14	3	99,83	10	3600	0,727	1909,1	0,0844	3063,123	1915,538	0,888	1,865
14	1	82,99	10	3593	0,603	2329,8	0,0772	3347,756	2309,989	0,876	2,186
14	2	83,19	10	3600	0,606	2279,2	0,0699	3699,646	2499,345	0,988	2,558
14	3	83,47	10	3588	0,606	2274,9	0,0763	3386,121	2373,256	0,915	2,370
14	1	62,14	10	3599	0,452	3021,8	0,0482	5360,879	3854,254	1,283	3,974
14	2	58,19	10	3587	0,422	3181,5	0,0493	5247,085	3649,055	1,329	3,710
14	3	62,27	10	3607	0,454	2960,5	0,0539	4792,959	3415,814	1,188	3,746
14	1	41,48	10	3610	0,303	4443,3	0,0336	7686,503	5803,276	1,863	6,367
14	2	41,77	10	3585	0,303	4332,0	0,0362	7133,826	5100,904	1,829	5,992
14	3	41,83	10	3595	0,304	4384,8	0,0330	7839,495	5567,543	1,920	5,882

14	1	24,87	10	3612	0,182	7125,1	0,0210	12279,053	9153,405	2,869	10,352
14	2	25,12	10	3592	0,183	7146,7	0,0227	11377,786	8198,045	2,820	9,599
14	3	25,06	10	3601	0,183	7181,8	0,0194	13321,705	9460,961	3,262	9,131
15	1	203,10	10	2716	1,116	728,0	0,1171	3902,609	28,013	13,591	0,729
15	2	204,45	10	2698	1,116	795,3	0,1072	4022,939	154,407	10,589	0,763
15	3	208,43	10	2730	1,151	742,1	0,1149	3812,144	174,916	9,228	0,787
15	1	155,18	10	2690	0,844	944,3	0,0903	4493,323	43,661	13,727	1,045
15	2	156,21	10	2684	0,848	974,7	0,0874	4680,777	43,878	13,240	0,837
15	3	158,95	10	2732	0,878	888,2	0,0960	4340,475	25,114	12,135	0,788
15	1	105,53	10	2696	0,576	1269,9	0,0671	5539,031	42,410	14,965	1,429
15	2	104,98	10	2710	0,576	1235,7	0,0690	4785,534	32,801	13,355	1,416
15	3	105,10	10	2707	0,576	1313,5	0,0649	5461,484	34,495	13,567	1,246
15	1	77,50	10	2705	0,424	1725,4	0,0494	5638,084	62,525	14,313	1,769
15	2	78,34	10	2676	0,424	1787,2	0,0477	5977,852	50,139	15,882	1,371
15	3	77,12	10	2730	0,426	1732,3	0,0492	6239,417	36,941	14,668	1,517
15	1	55,50	10	2698	0,303	2327,3	0,0366	8122,439	114,879	21,245	2,403
15	2	55,62	10	2692	0,303	2264,5	0,0381	6778,058	62,121	16,744	2,165
15	3	55,85	10	2693	0,304	2307,0	0,0393	6577,857	52,331	15,122	1,824
15	1	33,16	10	2709	0,182	3745,0	0,0286	9023,500	225,468	20,409	3,342
15	2	33,22	10	2716	0,183	3905,3	0,0304	8512,206	122,743	18,786	2,675
15	3	33,33	10	2707	0,183	3964,2	0,0328	7876,432	77,123	16,780	2,312
16	1	59,46	100	2758	0,332	3722,7	0,0361	10879,866	25,411	2,626	10,423
16	2	60,76	100	2711	0,333	3682,4	0,0365	9475,174	10,488	2,396	5,923
16	3	60,96	100	2690	0,332	3732,5	0,0360	10602,378	11,838	2,576	6,740
16	1	38,79	100	2702	0,212	5734,9	0,0234	15766,368	17,919	2,632	14,158
16	2	39,03	100	2697	0,213	5626,9	0,0239	16415,111	45,822	2,791	7,710
16	3	38,66	100	2711	0,212	5778,2	0,0233	15619,469	26,628	3,090	6,518
17	1	81,21	85	2790	0,458	2608,4	0,0470	8951,271	9,908	3,341	2,855
17	2	80,85	85	2778	0,454	2877,0	0,0426	9010,096	10,061	3,338	4,863
17	3	81,41	85	2759	0,454	1546,6	0,0793	8353,624	14,115	3,173	4,592
17	1	54,57	85	2756	0,304	3679,9	0,0333	12828,358	29,962	3,341	4,039
17	2	55,70	85	2712	0,306	3789,9	0,0323	12404,820	21,931	3,340	7,203
17	3	55,79	85	2731	0,308	3701,6	0,0331	12679,526	65,432	2,926	9,292
17	1	45,35	85	2676	0,246	4460,3	0,0275	14102,899	25,403	1,934	5,628
17	2	39,50	85	2700	0,216	5095,2	0,0241	16554,823	29,820	2,703	8,732
17	3	45,45	85	2670	0,246	4511,9	0,0272	15528,183	27,201	2,663	4,383
18	1	122,54	60	2700	0,669	1616,9	0,0662	6197,929	13,602	4,032	1,581
18	2	109,58	60	2721	0,603	1728,8	0,0619	6937,077	30,714	4,845	2,106
18	3	109,18	60	2743	0,606	1747,1	0,0612	5804,889	26,869	4,348	1,826
18	1	105,33	60	2701	0,576	1729,2	0,0619	7035,052	11,783	4,144	1,734
18	2	82,24	60	2731	0,454	2192,3	0,0488	8211,396	36,356	4,746	2,492
18	3	76,48	60	2741	0,424	2341,9	0,0457	8820,982	19,194	5,063	2,431
18	1	60,91	60	2704	0,333	2926,4	0,0366	11370,445	19,213	5,086	3,185

18	2	55,42	60	2702	0,303	3229,5	0,0331	12930,757	28,379	6,020	3,363
18	3	55,25	60	2710	0,303	2980,2	0,0359	9366,057	30,311	4,287	2,348
18	1	38,54	60	2720	0,212	4544,9	0,0235	17923,618	91,668	5,872	7,432
18	2	38,85	60	2710	0,213	4623,4	0,0231	17459,362	77,980	6,150	4,984
18	3	32,97	60	2725	0,182	4968,8	0,0215	13425,918	67,461	6,116	3,623
19	1	203,62	40	2709	1,116	902,3	0,1076	4074,876	33,656	10,424	0,828
19	2	199,28	40	2768	1,116	910,4	0,1066	4159,447	28,292	10,310	1,014
19	3	206,69	40	2741	1,146	892,2	0,1088	3950,269	35,081	10,495	1,015
19	1	160,72	40	2690	0,875	1078,7	0,0900	5005,447	28,529	12,673	1,215
19	2	151,36	40	2758	0,844	1154,1	0,0841	4818,985	25,559	11,476	1,199
19	3	158,49	40	2728	0,875	1110,0	0,0874	4538,678	24,632	10,109	1,207
19	1	107,05	40	2646	0,573	1554,5	0,0624	5073,387	40,362	11,390	1,170
19	2	108,23	40	2767	0,606	1485,6	0,0653	5022,276	33,647	10,876	1,273
19	3	105,33	40	2701	0,576	1587,9	0,0611	6301,767	42,219	13,122	1,640
19	1	54,71	40	2737	0,303	2821,5	0,0344	9397,240	114,140	17,334	2,419
19	2	55,34	40	2706	0,303	2770,8	0,0396	6948,174	79,799	12,153	1,808
19	3	55,17	40	2714	0,303	2838,6	0,0342	8588,044	98,633	14,977	2,330
19	1	33,14	40	2711	0,182	4530,6	0,0246	11164,025	137,702	18,935	3,021
19	2	32,98	40	2724	0,182	4494,7	0,0247	11149,006	117,375	16,889	2,827
19	3	33,13	40	2724	0,183	4497,2	0,0216	13367,651	146,031	20,997	3,394
20	1	180,47	20	2738	1,000	936,8	0,0948	4407,852	18,703	9,257	0,858
20	2	179,95	20	2734	0,995	906,3	0,0980	4564,855	21,610	8,724	1,228
20	3	179,03	20	2748	0,995	946,0	0,0939	4299,301	19,860	7,778	1,108
20	1	131,21	20	2727	0,724	1157,1	0,0768	6166,184	44,669	9,996	1,068
20	2	131,40	20	2711	0,721	1180,7	0,0753	6170,042	63,338	9,612	1,796
20	3	130,59	20	2740	0,724	1290,0	0,0689	6069,425	88,657	9,955	1,619
20	1	110,68	20	2694	0,603	1394,1	0,0637	6528,609	34,059	10,708	1,361
20	2	109,50	20	2723	0,603	1402,3	0,0634	6861,818	36,394	9,462	1,810
20	3	109,42	20	2737	0,606	1384,4	0,0642	6648,818	17,632	10,012	1,852
20	1	55,38	20	2704	0,303	2423,3	0,0367	12065,748	62,945	17,735	2,896
20	2	55,42	20	2690	0,302	2751,5	0,0323	12009,918	63,172	16,218	2,907
20	3	54,81	20	2732	0,303	2619,7	0,0339	12781,424	61,011	17,035	2,962
20	1	33,19	20	2695	0,181	3977,8	0,0223	15072,654	86,495	22,497	4,313
20	2	33,15	20	2710	0,182	4125,4	0,0215	19740,602	114,218	25,076	5,840
20	3	33,31	20	2697	0,182	4009,7	0,0222	17914,824	46,729	22,164	4,387
21	1	176,97	15	2780	0,995	938,3	0,0927	4704,979	83,937	9,254	0,675
21	2	178,45	15	2769	1,000	912,7	0,0953	4944,843	115,560	10,244	1,303
21	3	181,20	15	2727	1,000	891,1	0,0976	4948,526	92,486	10,659	1,313
21	1	130,97	15	2708	0,717	1216,4	0,0715	6399,932	32,586	12,478	2,166
21	2	132,86	15	2693	0,724	1123,1	0,0775	6061,645	21,098	11,935	1,723
21	3	131,79	15	2715	0,724	1182,3	0,0736	6477,913	32,721	12,423	1,597
21	1	108,46	15	2737	0,601	1276,8	0,0681	6592,967	33,303	12,680	1,440
21	2	109,58	15	2721	0,603	1349,0	0,0645	7029,478	39,371	12,849	1,863

21	3	107,16	15	2713	0,588	1528,7	0,0569	6897,456	35,403	12,940	1,728
21	1	54,83	15	2719	0,302	2472,1	0,0352	11409,335	57,631	19,247	2,277
21	2	55,42	15	2690	0,302	2519,8	0,0345	10971,634	61,946	18,685	3,062
21	3	55,12	15	2705	0,302	2495,8	0,0349	11189,417	59,821	18,965	2,674
21	1	33,26	15	2701	0,182	3913,1	0,0222	15846,587	88,049	26,297	3,609
21	2	33,23	15	2704	0,182	4070,1	0,0214	14412,871	80,724	22,513	4,161
21	3	33,24	15	2703	0,182	3997,2	0,0218	15127,308	84,388	24,369	3,904